

Le rôle de l'université dans la stratégie de transition énergétique

Mémoire présenté à Transition énergétique Québec

Consultation publique dans le cadre de l'élaboration du *Plan directeur en transition, innovation et efficacité énergétiques*.

Normand Mousseau
Professeur titulaire, Université de Montréal
Directeur académique, Institut de l'énergie Trottier

Louis Beaumier
Directeur exécutif, Institut de l'énergie Trottier

7 décembre 2017

Le rôle de l'université dans la stratégie de transition énergétique

Par Normand Mousseau et Louis Beaumier, Institut de l'énergie Trottier

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

Créé en 2013, grâce à un don généreux de la Fondation familiale Trottier, l'IET a pour but d'aider à former une nouvelle génération d'ingénieurs et de scientifiques qui comprennent les enjeux énergétiques, de soutenir la recherche de solutions durables pour aider à accomplir la transition qui s'impose et de contribuer à la diffusion des connaissances et aux débats sur les questions énergétiques. Ce mandat en fait une institution unique au Canada dans le secteur de l'énergie.

Basé à Polytechnique Montréal, l'IET rassemble des professeurs-chercheurs de HEC, de Polytechnique et de l'Université de Montréal. Cette diversité d'expertises permet la formation d'équipes de travail transdisciplinaires, condition essentielle à la compréhension systémique des enjeux énergétiques dans le contexte de lutte aux changements climatiques.

Institut de l'énergie Trottier
Polytechnique Montréal
2900, Boul. Édouard-Montpetit
2500, chemin de Polytechnique
Montréal (Québec) H3T 1J4
Web : iet.polymtl.ca
Twitter : @EnergieTrottier

Pour citer ce mémoire : N. Mousseau, L. Beaumier, « Le rôle de l'université dans la stratégie de transition énergétique », Institut de l'énergie Trottier, Polytechnique Montréal, 2017

© 2017 Institut de l'énergie Trottier, Polytechnique Montréal. Ce rapport n'engage que la responsabilité des auteurs.

Table des matières

Introduction – le rôle de l’université dans la stratégie de transition énergétique	4
La recherche comme pierre angulaire de la transition	5
Des indicateurs de performance inspirés des meilleures pratiques	6
Un suivi systémique pour une approche concertée.....	6
L’importance de la modélisation et de l’analyse indépendantes.....	7
L’université comme organisation de référence	8
Annexe A – Liste des recommandations	9

Introduction – le rôle de l’université dans la stratégie de transition énergétique

Le présent mémoire est déposé par l’Institut de l’énergie Trottier (IET) dans le cadre de la consultation lancée par Transition énergétique Québec (TEQ) en amont de l’élaboration de son premier plan directeur.

Il vise à (a) rappeler le potentiel de savoir et d’analyse que représente la communauté universitaire pour appuyer une transformation de société aussi profonde que celle que doit mener TEQ au cours des prochaines décennies, (b) souligner le rôle d’accompagnement que les universitaires jouent dans les pays qui réussissent à avancer dans la transition et (c) proposer une stratégie à suivre pour que le Québec atteigne les objectifs énergétiques de son Plan stratégique 2030, en particulier en matière de réduction de gaz à effet de serre, tout en assurant son développement économique et social.

Plus spécifiquement, la proposition présentée par l’IET élabore sur trois des fonctions définies à l’article 5 de la Loi sur Transition énergétique Québec :

Article 5 : Dans le cadre de sa mission, Transition énergétique Québec peut notamment:

[...]

6° réaliser des bilans de l’énergie au Québec ainsi que des études d’étalonnage sur les meilleures pratiques en matière de consommation et de production d’énergie;

7° soutenir la recherche et le développement dans le domaine énergétique;

8° établir, en concertation avec les principaux intervenants de la recherche et de l’industrie, une liste des sujets de recherche à prioriser[.]

La transition demande d’utiliser plus efficacement l’énergie, bien sûr, mais, par son ampleur, elle exige une transformation beaucoup plus profonde de la société québécoise : il faudra, au-delà de l’efficacité énergétique, modifier les sources d’énergie, transformer les procédés, changer les offres de services et les habitudes de consommation, revoir les infrastructures et adapter son occupation du territoire. Afin de remplir son mandat, TEQ se doit d’intégrer ces trois fonctions à l’ensemble de ses actions et les aborder de façon coordonnée afin d’optimiser les efforts de transition et maximiser les retombées environnementales, sociales et économiques.

TEQ doit donc, très rapidement, développer une relation étroite avec le monde universitaire afin de :

- contribuer au développement des procédés et technologies permettant une production et une utilisation de l’énergie plus efficace et, surtout, qui assure de meilleurs services;
- appuyer le développement de meilleurs indicateurs de performances;
- générer des scénarios, évaluer les coûts et les retombées possibles de diverses actions par le développement et l’utilisation d’outils de modélisation et d’analyse de pointe.

La recherche comme pierre angulaire de la transition

Ayant dans son mandat d'appuyer la recherche dans le domaine énergétique, il va de soi qu'un lien étroit doit être établi entre TEQ et le milieu universitaire, ce dernier regroupant la majorité des intervenants de premier ordre en recherche au Québec.

La recherche fondamentale et appliquée a certainement un rôle à jouer dans la transition énergétique. Dans ce contexte, on pense, bien sûr, au développement technologique lié à l'efficacité énergétique et au remplacement des sources d'énergie. Bien que nécessaires, toutefois, ces recherches ne seront pas suffisantes; deux autres axes de recherche doivent également être considérés : la modification des approches traditionnelles d'utilisation de l'énergie et le développement d'une meilleure compréhension des enjeux technico-économiques et sociaux liés aux services offerts par l'énergie.

L'efficacité étant par nature limitée par les lois fondamentales de la thermodynamique, les gains que l'on peut espérer dans certains secteurs sont nécessairement limités - ce qui se confirmera par les études d'étalonnage. Les objectifs ambitieux du Québec en matière énergétique et d'émission de GES ne peuvent être atteints principalement par la voie de l'efficacité énergétique; il faudra plutôt, pour une fraction importante des secteurs d'activité, modifier les approches traditionnelles et remplacer les procédés de fabrication, voire en développer de nouveaux afin de s'adapter à de nouvelles sources d'énergie. Les activités de recherche liées à de telles transformations demandent effort et temps, sans garantie de résultat. Cette absence de garantie ne doit pas occulter le caractère essentiel de cet axe de recherche. Le développement de procédés innovateurs est source de développement économique et permet de générer du savoir.

De même, il est important d'aller au-delà des enjeux technico-scientifiques liés à l'énergie pour inclure la question du service de l'énergie et de ses retombées économiques et sociétales. Une meilleure gestion du transport, par exemple, ou de la consommation d'électricité lors des périodes de grand froid hivernal, permettrait des économies considérables tout en offrant de nouvelles occasions d'affaires et en améliorant la compétitivité de l'économie québécoise et la qualité du service auprès de l'ensemble des citoyens.

C'est pourquoi il est important de soutenir la recherche afin de comprendre comment les programmes et mesures que l'État mettra en place agiront sur l'économie québécoise afin de minimiser les effets négatifs (par la mise en place de mesures additionnelles de mitigation par exemple), ainsi que les logiques de consommation d'énergie.

Mieux comprendre les besoins derrière la demande permettra d'innover dans les solutions à l'offre énergétique. Il y a là des pistes que la recherche doit explorer si l'on veut que la transition soit plus qu'une simple substitution de carburant.

Recommandation # 1

Que TEQ élabore, en collaboration avec les producteurs et utilisateurs d'énergie, les Fonds de recherche du Québec et le monde universitaire, un programme de soutien à la recherche sur la transition énergétique qui vise à structurer des groupes pluridisciplinaires dans la durée.

Des indicateurs de performance inspirés des meilleures pratiques

Il nous apparaît essentiel d'avoir comme point de départ les meilleures pratiques en matière de consommation, de production et d'efficacité énergétique, et ce pour de multiples raisons. Une des raisons les plus importantes est d'aider à la définition des indicateurs de performance, que TEQ doit mettre en place pour évaluer les différents programmes et mesures qui apparaîtront au plan directeur.

La définition des indicateurs de performance n'étant pas demandée aux organismes soumettant des programmes et mesures (art. 11 para. 2), c'est donc à TEQ qu'il revient de les définir et les rendre publics (article 17). Ceci assurera une évaluation cohérente et équitable des diverses propositions.

Les indicateurs de performance que définira TEQ ne devraient cependant pas servir qu'à l'évaluation des programmes et mesures du plan directeur. Ils doivent aller plus loin que la simple estimation des GES évités – bien qu'il y ait un travail d'uniformisation à faire ici aussi – et devraient inclure des composantes économique et sociale, en respect avec le mandat de TEQ.

Une partie des activités de recherche incluses dans le mandat de TEQ devrait donc être dévolue à la définition d'indicateurs et, plus important encore, à la création des outils nécessaires à leur évaluation.

Recommandation # 2

Que TEQ développe des indicateurs de performances multifactoriels (c.-à-d. allant au-delà de la seule réduction d'émission de GES), en s'appuyant sur les meilleures pratiques, si nécessaire en collaboration avec le milieu universitaire, et les rende disponibles à l'ensemble des parties prenantes de la transition énergétique, et se positionne comme l'organisation de référence en cette matière.

Un suivi systémique pour une approche concertée

Si les indicateurs ne doivent pas se limiter à la seule réduction de GES, ils ne devraient pas non plus se limiter à l'évaluation à la pièce des programmes et mesures. Ils doivent permettre une évaluation systémique des retombées et impacts.

(L'évaluation à la pièce est utile et pertinente dans une logique d'efficacité énergétique. En tant que reflet de l'efficacité d'une organisation, l'efficacité énergétique devrait être une préoccupation égoïste de chaque entreprise).

Il est possible qu'une mesure efficace individuellement ne le soit pas lorsqu'évaluée dans un contexte plus global. La somme de mesures individuellement efficaces, bien qu'offrant des gains à court terme, pourra s'avérer inefficace dans le moyen terme, puisque les gains d'efficacité seront limités pour chaque système de transformation d'énergie. Pour éviter ces optimisations locales, il faut aborder la transition énergétique sous l'angle de l'efficacité énergétique systémique.

Il importe donc que les bilans énergétiques et mesures d'étalonnage soient réalisés régulièrement puisqu'ils seront essentiels à la définition et la calibration d'indicateurs de performance systémiques. Des indicateurs systémiques bien définis auront une double fonction : d'abord permettre l'évaluation des programmes et mesures en place, mais aussi aider à l'identification des créneaux de recherche à prioriser. Cette double fonction aidera dans

la concertation avec les intervenants de la recherche et de l'industrie en donnant une perspective tant à court qu'à moyen et long terme – les différentes actions ne peuvent toutes être évaluées sur un horizon unique de cinq ans.

Recommandation # 3

Que TEQ s'engage à effectuer un suivi continu des progrès et gains systémiques obtenus par les programmes et mesures en place et à ce que les indicateurs systémiques de performance permettant ce suivi soient également utilisés dans l'identification des créneaux de recherche porteurs à moyen terme.

L'importance de la modélisation et de l'analyse indépendantes

Si la modélisation énergétique peut s'avérer utile dans le choix des objectifs, elle est indispensable dans l'élaboration des stratégies pour atteindre ceux-ci. C'est pourquoi la grande majorité des pays de l'OCDE disposent de différents modèles pour accompagner les politiques, évaluer les succès et les défis et mettre à jour les approches.¹

Les modèles permettent notamment :

- une évaluation prospective de l'évolution du secteur énergétique en fonction de différentes politiques et contraintes;
- la comparaison de scénarios selon différents critères – faisabilité, coûts, retombées, etc.;
- l'identification des stratégies et approches offrant le plus d'intérêt selon un ensemble d'objectifs à atteindre;
- le développement de critères et d'échelles pour l'évaluation au fil du temps des retombées des divers programmes et mesures, ce qui permet de mieux comprendre l'impact réel des mesures et les correctifs et améliorations à apporter afin d'augmenter celui-ci.

La plupart des nations qui progressent sur la transition énergétique, tels le Royaume-Uni et la France, ont fait de la modélisation et de l'analyse universitaire une partie intégrante de leur stratégie de lutte aux changements climatiques, comme on peut le voir, par exemple dans les plans du gouvernement britannique² ainsi que dans les rapports du *Committee on climate change*³, dirigé par des universitaires et responsable du suivi du plan d'action climatique au Royaume-Uni.

Si le monde universitaire québécois compte déjà sur plusieurs instituts et groupes de recherche liés à l'énergie, ces structures ne disposent pas d'un financement approprié afin de structurer, de compléter et d'intégrer leur capacité de modélisation et d'analyse afin d'appuyer correctement la transition énergétique et d'offrir, notamment :

¹ Voir à ce sujet: IET (2017), « Pour une initiative permanente de modélisation des systèmes énergétiques canadiens », Institut de l'énergie Trottier (IET), Canada, (disponible à cette adresse : <http://iet.polymtl.ca/publications/initiative-permanente-modelisation-systemes-energetiques-canadiens/>)

² <https://www.gov.uk/government/policies/energy-and-climate-change-evidence-and-analysis>

³ <https://www.theccc.org.uk/publications/>

- l'accès aux ressources pour le développement de modèles énergétiques et l'élaboration de scénarios prospectifs;
- l'identification des effets socio-économiques – positifs et négatifs – des différents scénarios;
- l'information de référence sur les technologies de transformation et d'utilisation de l'énergie (efficacité, coûts, etc.);
- le développement de scénarios d'impacts et accompagnement dans l'élaboration et l'évaluation de programmes ou la mise en place de mesures de transition énergétique.

Recommandation # 4

Que TEQ mette en place, possiblement basée dans le milieu universitaire, une structure visant à soutenir le développement et rendre disponibles aux décideurs les outils d'analyses et les expertises nécessaires pour comprendre, de manière quantitative, la transition énergétique au Québec. Cette compréhension passera notamment par : 1) des analyses de la situation; 2) la quantification des mesures proposées; 3) le suivi des programmes et actions; 4) l'identification des pistes de solutions appropriées pour le Québec.

L'université comme organisation de référence

En plus de son rôle de premier plan dans la recherche, le milieu universitaire peut agir à titre d'organisation neutre et indépendante pour évaluer les progrès, estimer l'efficacité de différents programmes et mesures existants et proposés, et fournir des scénarios basés sur ces derniers au gouvernement.

Tel que mentionné, le développement des outils nécessaires à ces différentes fonctions représente en soi un champ de recherche dans lequel il sera important d'investir, d'abord pour assurer l'atteinte de nos objectifs efficacement, ensuite pour faire avancer les connaissances et développer une expertise de pointe, permettant au Québec de se démarquer sur la scène internationale.

Aussi, puisque plusieurs ministères et organismes sont à élaborer des plans directeurs ou stratégiques ayant un lien avec des enjeux liés aux changements climatiques – et donc à la transition énergétique – il nous apparaît primordial que ces plans soient, sinon élaborés, au moins suivis dans leur mise en œuvre à l'aide d'outils communs et ouverts, accessibles à l'ensemble de la communauté, incluant le gouvernement, le monde universitaire, le monde des affaires, les organismes non gouvernementaux et les groupes de citoyens.

Recommandation # 5

Que TEQ établisse une collaboration étroite avec le milieu universitaire afin de produire le savoir, les jeux de données, l'analyse et la modélisation nécessaires pour appuyer son mandat de transition énergétique.

Dans ce contexte, il est essentiel que ce travail soit public et accessible à l'ensemble de la population.

Recommandation # 6

Que TEQ reconnaisse l'importance de la recherche ouverte et accessible et adopte une politique visant à ce que les travaux, modèles et jeux de données générés dans le cadre des recherches qu'elle finance soient librement accessibles à l'ensemble de la société.

Annexe A – Liste des recommandations

1. Que TEQ élabore, en collaboration avec les producteurs et utilisateurs d'énergie, les Fonds de recherche du Québec et le monde universitaire, un programme de soutien à la recherche sur la transition énergétique qui vise à structurer des groupes pluridisciplinaires dans la durée.
2. Que TEQ développe des indicateurs de performances multifactoriels (c.-à-d. allant au-delà de la seule réduction d'émission de GES), en s'appuyant sur les meilleures pratiques, si nécessaire en collaboration avec le milieu universitaire, et les rende disponibles à l'ensemble des parties prenantes de la transition énergétique, et se positionne comme l'organisation de référence en cette matière.
3. Que TEQ s'engage à effectuer un suivi continu des progrès et gains systémiques obtenus par les programmes et mesures en place et à ce que les indicateurs systémiques de performance permettant ce suivi soient également utilisés dans l'identification des créneaux de recherche porteurs à moyen terme.
4. Que TEQ mette en place, possiblement basée dans le milieu universitaire, une structure visant à soutenir le développement et rendre disponibles aux décideurs les outils d'analyses et les expertises nécessaires pour comprendre, de manière quantitative, la transition énergétique au Québec. Cette compréhension passera notamment par : 1) des analyses de la situation; 2) la quantification des mesures proposées; 3) le suivi des programmes et actions; 4) l'identification des pistes de solutions appropriées pour le Québec.
5. Que TEQ établisse une collaboration étroite avec le milieu universitaire afin de produire le savoir, les jeux de données, l'analyse et la modélisation nécessaires pour appuyer son mandat de transition énergétique.
6. Que TEQ reconnaisse l'importance de la recherche ouverte et accessible et adopte une politique visant à ce que les travaux, modèles et jeux de données générés dans le cadre des recherches qu'elle finance soient librement accessibles à l'ensemble de la société.

Annexe jointe au mémoire



Pour une initiative permanente de modélisation des systèmes énergétiques canadiens

Août 2017



INSTITUT
DE L'ÉNERGIE
TROTTIER

Et

IQCarbone

Institut québécois du carbone

Auteurs

Pour l'IET :

- Louis Beaumier, M. Sc. A. – Directeur exécutif
- Normand Mousseau, Ph. D. – Directeur académique

Pour l'IQCarbone :

- Simon-Philippe Breton, Ph. D. – Directeur de la recherche (technologies)
- Mark Purdon, Ph. D. – Directeur général

Les auteurs souhaitent remercier les personnes suivantes pour la révision du document et leurs commentaires :

- Olivier Bahn, HEC Montréal
- Richard Carlson, Pollution Probe
- Robert Hoffman, whatIf? Technologies
- Maya Jegen, Département de science politique, UQAM
- David Layzell, Canadian Energy Systems Analysis Research (CESAR)
- Pierre-Olivier Pineau, HEC Montréal
- Ralph Torrie, Canadian Energy Systems Analysis Research (CESAR)
- Mark Winfield, Environmental Studies, York University

Citation

IET (2017), “ Pour une initiative permanente de modélisation des systèmes énergétiques canadiens ”, Institut de l'énergie Trottier (IET), Canada, <http://iet.polymtl.ca/publications/initiative-permanente-modelisation-systemes-energetiques-canadiens/>

Avis de non-responsabilité

Toutes les précautions raisonnables ont été prises par l'IET pour vérifier la fiabilité du matériel dans cette publication. Ni l'IET, ni aucune personne agissant en leur nom ne peut être tenue pour responsable de l'utilisation qui découlerait de ces informations



À propos de l'IET

La mission de l'Institut de l'énergie Trottier (IET) s'articule autour de trois axes : la formation, la recherche et la diffusion. Ainsi, l'IET s'emploie à favoriser une compréhension systémique et transdisciplinaire des enjeux énergétiques auprès de la nouvelle génération d'ingénieurs. Il vise également à encourager la recherche de solutions durables permettant d'assurer l'avenir énergétique et accroître le niveau de qualité des débats sociaux sur ces questions.

La création de l'IET a été rendue possible grâce à un don exceptionnel de la Fondation familiale Trottier à Polytechnique Montréal.



À propos de l'IQCarbone

L'Institut québécois du carbone (IQCarbone) est un organisme à but non-lucratif dont le but consiste à encourager et diffuser les recherches portant sur les politiques en matière de changements climatiques au Québec et ailleurs dans le monde.

À cette fin, l'Institut propose des recherches originales et innovatrices qui se distinguent par leur qualité et leur rigueur scientifique. L'Institut vise également à devenir le plus grand regroupement de spécialistes, d'experts et d'universitaires travaillant sur les politiques en matière de changements climatiques au Québec et ailleurs dans le monde.

Nous reconnaissons le soutien financier que nous a apporté le Clean Economy Fund pour la production de ce livre blanc.

Le Clean Economy Fund est un organisme de financement collaboratif ayant pour objectif de maximiser l'impact des dons philanthropiques destinés à la création d'une économie canadienne propre, faible en carbone, résiliente et prospère.

Table des matières

Sommaire exécutif.....	4
1/Introduction.....	7
2/À propos de la modélisation des systèmes énergétiques.....	8
2.1/En quoi consiste la modélisation d'un système?	8
2.2/Les besoins en matière de données	8
2.3/Les principaux types de modèles.....	8
Les modèles descendants.....	9
Les modèles ascendants.....	9
Les modèles hybrides.....	9
Les modèles sectoriels.....	9
La modélisation des comportements émergents	10
2.4/Au-delà des modèles.....	10
3/Les meilleures pratiques pour intégrer la modélisation de l'énergie et du climat dans l'élaboration des politiques	11
3.1/Royaume-Uni.....	11
3.2/Suède.....	12
3.3/Gouvernement fédéral des États-Unis.....	14
3.4/Californie.....	16
4/Les principes clés de la modélisation des systèmes énergétiques	19
4.1/La transparence : des données et une modélisation ouvertes	19
4.2/La confiance : un forum sur la modélisation pour la discussion, la validation et la comparaison	19
4.3/La durabilité : une infrastructure de connaissances spécialisée.....	19
4.4/L'arrimage clair aux politiques : un cadre institutionnel liant modélisation et politiques	20
5/Le contexte canadien.....	21
5.1/Le fédéralisme canadien.....	21
5.2/Le Conseil de la Fédération.....	21
5.3/La modélisation des systèmes énergétiques au Canada.....	22
5.4/Les lacunes actuelles dans la modélisation des systèmes énergétiques au Canada	24
Le manque de soutien à la modélisation ouverte de systèmes énergétiques.....	24
Le manque de données et les efforts modérés de modélisation	24
L'absence de cadre de planification liant la modélisation et les politiques climatiques et énergétiques	24
L'analyse insuffisante des liens entre énergie et efforts pancanadiens de réduction des émissions.....	25
6/Pour aller plus loin.....	26
Annexe.....	28
Références.....	30

Sommaire exécutif

Alors que les systèmes énergétiquesⁱ ont toujours été complexes, ils deviennent encore plus difficiles à saisir lorsque la société doit relever le défi de les transformer en vue de réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) responsables des changements climatiques. En outre, des forces perturbatrices, telles que l'intelligence artificielle, les technologies de l'information, la baisse rapide des coûts de stockage et de distribution de l'énergie, représentent un défi pour les secteurs industriels et les modèles commerciaux qui ont façonné l'économie des différentes régions, au Canada comme ailleurs dans le monde.

Le fait que les systèmes énergétiques émergents semblent être davantage axés sur l'information, les technologies de l'information et les marchés de services énergétiques, et dans une moindre mesure sur les ressources naturelles elles-mêmes, renforce la raison d'être d'un leadership national. Certaines économies parmi les plus puissantes au sein de l'OCDE possèdent peu de ressources énergétiques mais ont élaboré d'importantes politiques énergétiques nationales.

Les modèles de systèmes énergétiques revêtent donc plus d'importance que jamais pour explorer et quantifier les avenues énergétiques possibles dans l'avenirⁱⁱ, étudier l'efficacité des options politiques et proposer aux différentes régions la meilleure voie à suivre dans le cadre de leur processus de transformation vers la viabilité économique et environnementale.

Dans ce contexte, la modélisation des systèmes énergétiques joue un rôle clé car elle est à la fois un moyen de comprendre les changements qui se produisent et un outil prospectif pour les décideurs. Elle permet d'informer les gouvernements et les industries du secteur énergétique ainsi que, plus important peut-être encore, de nombreux secteurs non énergétiques qui sont essentiels pour la détermination de la demande énergétique et la production des gaz à effet de serre (GES).

La validité et la pertinence des données de sortie des modèles dépendent à la fois de la qualité des données d'entrées (technologies, demandes d'utilisation finale des services énergétiques, prix des produits importés/exportés, l'état des réserves et de la production, etc.) et de celles des modèles utilisés. C'est la raison pour laquelle il est urgent que le Canada mette en place une initiative permettant d'assurer un développement durable ainsi que la mise en application de modèles énergétiques susceptibles de soutenir ses objectifs en matière d'énergie et de changements climatiques.

La modélisation des systèmes énergétiques est utilisée dans un certain nombre de pays pour soutenir et orienter l'élaboration des politiques, en particulier dans le contexte des efforts de réduction des GES. Dans les quatre administrations étudiées dans le présent document – le Royaume-Uni, la Suède, le gouvernement fédéral des États-Unis et la Californie – la modélisation est conçue comme une “ infrastructure de connaissances ” qui se fonde sur :

- un cadre institutionnel à long terme clairement défini;
- des ressources dédiées à l'entretien et au fonctionnement; et
- un accent mis sur l'expertise locale et nationale afin de développer et exécuter des modèles adaptés aux besoins nationaux.

Le présent examen des pratiques exemplaires en matière de modélisation des systèmes énergétiques dans ces administrations révèle quatre principes clés à respecter pour assurer la production d'informations pertinentes :

La transparence – les modèles et les données doivent être **ouvertes (open source)** et **accessibles à tous** pour faciliter l'analyse de la modélisation et assurer la responsabilité publique. L'accès en temps opportun aux données énergétiques précises et détaillées est également essentiel pour assurer la fiabilité de la modélisation, et ce d'autant plus que les exigences en matière d'information évoluent avec l'émergence des nouvelles technologies (telles que les ressources énergétiques distribuées et le réseau électrique intelligent).

La confiance – Pour que les décideurs politiques, la société civile et le secteur privé puissent faire confiance aux résultats de la modélisation et agir en fonction de ceux-ci, ces résultats doivent être présentés avec un degré élevé de rigueur académique et ouvertement discutés, validés et comparés.

ⁱ Les systèmes énergétiques sont les technologies, les infrastructures et les habitudes associées à la récupération, la conversion, le transport et l'utilisation finale des carburants et de l'électricité sous la forme de biens et de services. Ces systèmes ont une incidence sur l'économie, l'environnement, la santé et la culture de la société humaine.

ⁱⁱ Une avenue énergétique se définit comme étant une description détaillée du calendrier et de l'ampleur des changements nécessaires à apporter en matière de technologies, d'infrastructures et de comportements pour atteindre un objectif de réduction des émissions.

La durabilité – les modèles énergétiques et leurs ensembles de données connexes doivent non seulement être développés, mais aussi être continuellement maintenus, améliorés et mis à jour. Une **infrastructure de connaissances spécialisée** est nécessaire à cette fin en ce qui concerne l'accès aux données, les ressources informatiques et le personnel qualifié qui développera, maintiendra et exécutera ces modèles.

Un arrimage clair aux politiques – Exiger que la modélisation des systèmes énergétiques soit prise en compte dans le processus politique est une façon d'**arrimer la modélisation à la politique**. De telles approches accroissent non seulement la responsabilisation des décideurs politiques en les obligeant à intégrer les résultats de la modélisation dans leur prise de décision, mais elles établissent aussi des ponts entre les modélisateurs et les décideurs politiques, ce qui facilite la compréhension des incertitudes liées à la modélisation et permet d'apporter des mises à jour plus opportunes aux politiques, ce qui permet d'accroître leur efficacité.

La réalité du fédéralisme canadien rend la modélisation concrète des systèmes énergétiques, ainsi que la conception des organismes chargés de cette modélisation, plus complexes qu'au sein des systèmes unitaires, tout en augmentant le besoin de modéliser les connaissances, au niveau tant fédéral que provincial. L'héritage politique du Programme énergétique national de 1980 est tel que le gouvernement fédéral canadien continue à être réticent face à tout ce qui ressemble à une stratégie énergétique nationale. L'annonce en 2015 d'une Stratégie canadienne de l'énergie a donc été confiée au Conseil de la Fédération (CdF). Cette situation, qui est loin d'être unique dans le monde, ne favorise pas la mise en œuvre d'une capacité de modélisation des systèmes énergétiques solidement établie dans le pays.

En plus d'un certain nombre de groupes actifs dans les universités du Canada, trois entités fédérales principales ont entrepris des activités de modélisation des systèmes énergétiques, soit l'Office national de l'énergie (ONE), Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) et Ressources naturelles Canada (RNCan). Bien que ces organismes gouvernementaux canadiens se soient dotés d'une certaine capacité de modélisation, celle-ci s'est généralement limitée à la production de perspectives reposant sur des codes exclusifs et des ensembles de données développés et gérés par des sociétés d'experts-conseils souvent établies à l'extérieur du Canada. En fait, deux des trois principales entités fédérales qui ont entrepris des activités de modélisation ont utilisé un modèle exclusif étranger (2020 Energy) dans le cadre de leurs dernières initiatives : Environnement et Changement climatique Canada pour l'établissement des *Tendances en matière d'émissions de GES au Canada*, et l'Office national de l'énergie pour la production de son rapport *Avenir énergétique du Canada 2016*.

Contrairement à d'autres pays, le Canada ne possède pas de programme destiné à soutenir la modélisation permanente des systèmes énergétiques. **À défaut d'un soutien institutionnel à long terme apporté aux infrastructures de modélisation des systèmes énergétiques**, une grande partie de la modélisation des systèmes énergétiques dans le pays est réalisée par des sociétés d'experts-conseils privées, utilisant des modèles et des ensembles de données exclusifs, ce qui soulève des inquiétudes en ce qui concerne le manque de transparence et la validité des analyses.

Produit par l'ONE, le rapport intitulé *Avenir énergétique du Canada 2016* met également en évidence les **efforts de scénarisation limités** consentis pour établir des perspectives énergétiques, car il ne présente qu'un scénario de statu quo. Pour obtenir une perspective plus complète, nous devons remonter jusqu'en 2006, soit la dernière année au cours de laquelle Ressources nationales Canada (RNCan) a produit un rapport. Une **capacité aussi limitée à produire des informations et des perspectives énergétiques pour le Canada** limite grandement l'impact que la modélisation peut avoir sur l'évaluation et la conception des politiques. Des informations pertinentes sur la situation du Canada sont plus susceptibles d'être trouvées dans les perspectives produites par l'US Energy Information Administration (EIA) [Administration des informations énergétiques des États-Unis] et par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) que dans les sources internes.

Bien que la plupart des efforts canadiens de modélisation aspirent à influencer la politique climatique et énergétique, ils **ne disposent pas d'un cadre qui les arrime au processus politique** et, ce qui est tout aussi important, **souffrent des efforts limités consentis pour prendre en compte les liens qui existent entre l'énergie et les efforts de réduction des émissions**.

Il existe de nombreuses études pancanadiennes s'intéressant au coût de l'énergie et à la réduction des émissions pour les provinces et les territoires canadiens. Cependant, à notre connaissance, aucune étude n'a cherché à envisager une coopération interprovinciale, en matière de réduction des émissions, sous l'angle d'un système pancanadien d'échange de droits d'émission ou d'une taxe harmonisée sur le carbone. **La modélisation des systèmes énergétiques intégrés, orientée sur les implications du négoce des émissions, mérite sans aucun doute davantage d'attention.**

Notre examen fait clairement ressortir que le Canada possède une expertise de niveau international en matière de modélisation. Néanmoins, deux éléments clés font défaut : (i) un financement permanent et prévisible à long terme pour le développement, la maintenance et le fonctionnement d'une diversité de modèles de systèmes énergétiques; et (ii) un cadre national qui permet aux spécialistes de travailler ensemble, tout en dialoguant avec les décideurs politiques et le grand public, à l'atteinte d'objectifs énergétiques et climatiques, et ce, de façon à ce que le processus décisionnel prenne davantage en compte une vision systémique.

Nous recommandons donc que **le gouvernement fédéral canadien affecte des ressources à la mise en œuvre d'une initiative de modélisation des systèmes énergétiques (IMSE) permanente** qui permettrait de :

1. Acquérir ou utiliser des modèles de systèmes énergétiques qui sont disponibles dans l'espace public et gérés de façon à être libre d'accès, en source ouverte et transparents pour les utilisateurs formés au Canada.
2. Utiliser des institutions existantes pour créer et pérenniser une infrastructure de connaissances en modélisation des systèmes énergétiques d'une manière qui reflète la diversité régionale du Canada.
3. Soutenir la coordination des efforts de modélisation, d'analyse et de communication à l'échelle nationale afin d'assurer l'ouverture et l'indépendance ainsi que la collaboration, les comparaisons, les échanges et l'innovation.

1/Introduction

La plupart des efforts de modélisation des systèmes énergétiquesⁱⁱⁱ ont commencé dans les années 1970, lorsque la crise mondiale du pétrole a suscité l'intérêt d'utiliser le pouvoir informatique émergent pour expliquer le lien qui unit l'économie et le secteur de l'énergie (Bahn et al., 2005; Huntington et al., 1982). Le défi des changements climatiques a suscité un regain d'intérêt pour la modélisation des systèmes énergétiques; celle-ci fait dorénavant partie de nombreuses initiatives en matière de politique climatique.

Le Canada a pris récemment des engagements, dans le cadre de l'Accord de Paris de 2015, visant à réduire d'ici 2030 les émissions de 30 % par rapport aux niveaux de 2005. Il est cependant préoccupant de constater que les différentes avenues susceptibles de permettre au pays d'atteindre cet objectif ne sont pas bien comprises. Les décideurs politiques canadiens sont donc contraints de prendre des décisions à l'aveuglette, sans une connaissance suffisante de leurs incidences techniques, économiques, sociales et politiques – une situation qui est en partie la conséquence d'un manque d'utilisation de la modélisation des systèmes énergétiques.

Il existe évidemment une certaine capacité de modélisation des systèmes énergétiques au Canada, mais celle-ci est éparpillée entre divers organismes gouvernementaux, universités et sociétés d'experts-conseils qui sont peu coordonnés entre eux. Plus important encore, cette capacité, en particulier dans le cas de la modélisation techno-économique, a tendance à n'être exploitée qu'au cas par cas. De plus, elle repose principalement sur des modèles fermés et privés qui ne sont réellement compris que par leurs créateurs. Il manque au Canada une initiative de modélisation permanente, ouverte et coordonnée permettant d'assurer l'apprentissage itératif, la transparence, la formation et l'arrimage avec le processus politique en matière d'énergie et de climat.

Ce manque de capacité, et la mauvaise compréhension du secteur de l'énergie qui en découle, ont miné les efforts précédents du Canada en matière de politique climatique. Bien que le Canada ait adopté un objectif de réduction de 6 % par rapport aux niveaux d'émissions de 1990 en vertu du Protocole de Kyoto de 1997 (Bernstein, 2002: 221-223), il manquait de connaissances et de planification pour atteindre cet objectif ambitieux. En partie en raison de l'absence d'une avenue clairement définie, les émissions du Canada ont progressé dans la direction opposée et atteint en 2014 un niveau de 16 % supérieur à ceux de 1990 (gouvernement du Canada, 2016).

En se référant aux meilleures pratiques mises en œuvre dans d'autres administrations, soit le Royaume-Uni, la Suède, le gouvernement fédéral des États-Unis et la Californie, ce livre blanc démontre comment d'autres économies avancées utilisent la modélisation des systèmes énergétiques et les spécialistes de l'énergie pour concevoir des politiques et des actions plus efficaces. Il plaide également en faveur de la création d'une initiative permanente de modélisation à long terme des systèmes énergétiques adaptée aux besoins et à la réalité du Canada.

ⁱⁱⁱ Les systèmes énergétiques sont les technologies, les infrastructures et les habitudes associées à la récupération, la conversion, le transport et l'utilisation finale des carburants et de l'électricité sous la forme de biens et de services. Ces systèmes ont une incidence sur l'économie, l'environnement, la santé et la culture de la société humaine.

2/À propos de la modélisation des systèmes énergétiques

Alors que les systèmes énergétiques sont complexes par nature, ils sont de plus en plus difficiles à saisir lorsque la société doit relever le défi de les transformer pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) responsables des changements climatiques. En outre, des forces perturbatrices, telles que l'intelligence artificielle, les technologies de l'information, la baisse rapide des coûts de stockage et de distribution de l'énergie, représentent un défi pour les secteurs industriels et les modèles commerciaux. Les modèles de systèmes énergétiques revêtent donc plus d'importance que jamais pour explorer et quantifier les avenues énergétiques possibles dans l'avenir^{iv}, examiner l'efficacité des options politiques et proposer aux régions la meilleure voie à suivre dans le cadre de leur processus de transformation vers la viabilité économique et environnementale.

2.1/En quoi consiste la modélisation d'un système?

Dans la modélisation et la simulation d'un système, on utilise des équations mathématiques pour décrire l'interaction existant entre les composants de ce système, ceci dans le but de reproduire le comportement de caractéristiques spécifiques dudit système. En résolvant cet ensemble d'équations ou en répétant son évolution sous l'influence de différentes contraintes, on peut obtenir des informations sur différents sujets, tels que les avenues possibles permettant une décarbonation, les interactions entre les systèmes énergétiques, les impacts de diverses politiques et mesures techniques et les coûts associés à certains scénarios en matière d'énergie (Hall et Buckley, 2016: 612).

Les activités de modélisation et de simulation des systèmes énergétiques doivent être considérées comme un outil prospectif pour les décideurs politiques et un moyen de comprendre les changements en cours. Elles peuvent orienter les politiques et les décisions d'investissement prises non seulement par les gouvernements et les industries du secteur de l'énergie, mais aussi, ce qui est plus important peut-être encore, par de nombreuses industries du secteur non énergétique qui jouent un rôle central en ce qui concerne la détermination de la demande d'énergie et des émissions de GES (par ex. la conception des bâtiments, le système alimentaire, la mobilité des personnes, le design urbain, etc.).

2.2/Les besoins en matière de données

Tous les modèles énergétiques nécessitent des données d'entrée qui fournissent des informations sur les différentes technologies, les demandes d'utilisation finale des services énergétiques, le prix des produits importés/exportés, l'état des réserves et de la production, etc. (Vaillancourt, 2010). La validité des données de sortie d'un modèle dépend étroitement de la pertinence de ce modèle et de la qualité des données d'entrée. Il est donc primordial que des données énergétiques mises à jour, fiables et pertinentes, ceci comprenant des séries chronologiques, soient disponibles en tant que données d'entrée pour les modèles.

2.3/Les principaux types de modèles

Les modèles de systèmes énergétiques sont généralement classés^v comme étant ascendants ou descendants (Bahn et al., 2005; Rivers et Jaccard, 2005; Vaillancourt, 2010). Voici comment Bahn et al. présentent ces deux types de modèles (2005) :

L'approche ascendante, d'esprit technico-économique, conduit à la création de modèles ventilés représentant le secteur de l'énergie avec beaucoup de détails. En revanche, l'approche descendante, d'esprit macroéconomique, conduit à la création de modèles agrégés dans le sens où ils utilisent des variables économiques globales [...]. Ces deux catégories de modèles sont complémentaires [...]. Les modèles ascendants sont appropriés pour l'évaluation des nouvelles technologies et l'analyse des coûts marginaux. Les modèles descendants, quant à eux, sont plus adaptés à l'analyse des impacts macroéconomiques des politiques énergétiques.

^{iv} Une avenue énergétique se définit comme étant une description détaillée du calendrier et de l'ampleur des changements nécessaires à apporter en matière de technologies, d'infrastructures et de comportement pour atteindre un objectif de réduction des émissions.

^v Une autre classification possible fait la différence entre la simulation et l'optimisation, cette dernière correspondant à des modèles calculant les avenues de transition énergétique optimales (Bahn et al., 2005).

Les modèles descendants

Les modèles descendants adhèrent à une approche macroéconomique en vue de simuler un système énergétique utilisant des relations économiques globales dérivées empiriquement de données historiques. Ils saisissent les relations entre le secteur économique et les autres secteurs de l'économie, mais ils ne sont pas explicites sur le plan technologique. Cela permet aux décideurs politiques d'étudier les impacts des politiques sur l'économie mondiale et les variables macroéconomiques, telles que l'emploi et le produit intérieur brut. Des exemples de ces modèles descendants incluent des modèles d'équilibre informatique tels que le Modèle régional d'équilibre énergétique général (R-GEEM), développé pour le Canada, ou l'E-DRAM en Californie.

Les modèles ascendants

Les modèles ascendants adoptent une approche d'ingénierie techno-économique en vue d'explorer une grande variété d'avenirs énergétiques rendus possibles grâce à des changements en matière de technologie, d'infrastructure ou de comportement (modèles exploratoires) ou d'identifier l'avenue la moins onéreuse pour répondre aux demandes de services énergétiques (tout en atteignant les objectifs de réduction des émissions) en fonction des meilleures technologies disponibles (modèles d'optimisation).

Les modèles exploratoires permettent aux chercheurs d'évaluer les implications des changements (y compris les changements perturbateurs) ayant une incidence sur nos systèmes énergétiques et qui sont induits par diverses forces telles que, entre autres, les émissions de GES ou les politiques en matière de changements climatiques. Le concept à l'origine des modèles exploratoires consiste d'abord à définir un avenir crédible, convaincant et souhaitable qui réponde aux objectifs sociétaux, puis d'explorer les instruments politiques les plus à même de permettre de réaliser cet avenir. Le modèle du Canadian Energy Systems Simulator (CanESS) [Simulateur des systèmes énergétiques canadiens], développé par WhatIf? Technologies Inc., est un exemple de modèle exploratoire.

Les modèles d'optimisation se concentrent sur des critères spécifiques pour favoriser le changement des systèmes énergétiques (par ex. la réduction des émissions de GES). La technologie et les diverses sources d'énergie sont étudiées en détail et caractérisées explicitement en fonction de leurs attributs techniques et économiques, tandis que la demande d'énergie (utile) est exprimée de manière exogène (Söderholm, 2012; Vaillancourt, 2010). Ce faisant, les modèles d'optimisation sont capables de prédire de quelle façon les politiques axées sur la technologie ou les systèmes de tarification du carbone sont susceptibles de façonner le changement des systèmes énergétiques. De telles études revêtent souvent un grand intérêt pour les décideurs politiques. Des exemples de modèles d'optimisation ascendants incluent les modèles MARKAL et TIMES de l'AIE.

Les modèles hybrides

Compte tenu des avantages et des inconvénients des modèles ascendants et descendants, des modèles hybrides ont été développés. Le modèle CIMS en est un exemple; il a été développé à l'Université Simon Fraser pour permettre la modélisation de la politique climatique canadienne (Rivers et Jaccard, 2005). D'autres exemples sont les modèles TIMES-MACRO et le modèle MERGE (Manne et Richels, 2005; Kypreos et Bahn, 2003). Les modèles hybrides sont particulièrement conçus pour fournir de meilleures estimations des coûts, car les modèles uniquement ascendants ont habituellement tendance à prévoir des estimations des coûts relativement faibles pour la réduction des émissions par rapport aux modèles descendants.

Les modèles sectoriels

En plus de ces modèles, qui représentent généralement des secteurs énergétiques entiers, un certain nombre de modèles énergétiques se concentrent sur des aspects sectoriels cruciaux pour la production, le transport et l'utilisation de l'énergie. Ils comprennent les modèles axés sur l'extraction et l'exploitation minière, les modèles de réseaux de transport et de distribution ainsi que les modèles relatifs aux secteurs de la construction, de l'efficacité énergétique et du transport (voir par exemple Weijermars et al. [2012]). Bien que ces modèles aient été principalement utilisés dans des structures en silos, la transition énergétique nécessite l'adoption d'une approche plus intégrée permettant une communication et des échanges accrus entre les différentes communautés dédiées à la modélisation des systèmes énergétiques.

La modélisation des comportements émergents

La disponibilité de larges ensembles de données et une grande puissance de calcul ont ouvert la voie à de nouvelles approches de modélisation des systèmes énergétiques basées sur des informations précises concernant les liens existant entre les différents modes de consommation.

Généralement appelés “ données massives ” (Manyika et al., 2011), ces nouveaux grands groupes de données offrent de nouvelles opportunités pour la modélisation des systèmes énergétiques. Manyika et al. suggèrent que les données massives offriront des avantages, non seulement parce qu’elles permettent de faire des expérimentations pour découvrir les préférences, démontrer la variabilité et améliorer la performance, mais aussi parce qu’elles remplacent/prennent en charge les décisions prises par les humains à l’aide d’algorithmes automatisés, ce qui ouvre la voie à la création de nouveaux modèles, produits et services commerciaux innovateurs. Afin d’inclure ces nouveaux comportements de système dans la modélisation prospective, il est nécessaire de créer une famille de modèles différente.

La Modélisation fondée sur l’agent (MFA) en est un exemple. Dans ce type de modélisation, les éléments de base – ou agents – sont utilisés pour modéliser l’hétérogénéité des acteurs du système, leurs interactions sociales et leurs processus décisionnels, y compris certains phénomènes émergents complexes qui ne peuvent pas être facilement pris en compte par des méthodes plus traditionnelles, telles que la diffusion d’une innovation dans un système socio-économique (Kiesling et al., 2012). Un exemple récent de ces phénomènes est l’arrivée des technologies de production d’énergie distribuée, comme le photovoltaïque solaire, qui impliquent un “ changement technologique et commercial majeur ” qui n’a pas été pris en compte dans les prévisions traditionnelles de modélisation (Rai et Henry, 2016).

2.4/Au-delà des modèles

Pour affiner la modélisation, il faut non seulement améliorer les techniques d’analyse et la capacité de traitement des données, mais également comprendre le rôle de la modélisation dans le processus d’élaboration des politiques (Geels, 2016, No. 4036). Le développement de la capacité de modélisation doit donc soutenir une perspective de spécialiste “ extérieur ” qui peut fournir une analyse critique des résultats de la modélisation, en reconnaissant les incertitudes, les biais et les limites de chaque modèle, ainsi que de l’approche dans son ensemble (Flyvbjerg, 2013; Lovo et Kahneman, 2003).

Ce sujet commence seulement à attirer l’attention qu’il mérite, étant donné que la nature hautement technique de la modélisation tend à inhiber la recherche interdisciplinaire et transdisciplinaire. En l’absence d’une communauté œuvrant de concert à la modélisation des systèmes énergétiques, cet aspect est sous-développé et fait cruellement défaut au Canada.

3/Les meilleures pratiques pour intégrer la modélisation de l'énergie et du climat dans l'élaboration des politiques

La modélisation des systèmes énergétiques est utilisée dans un certain nombre de pays pour soutenir et orienter l'élaboration des politiques, en particulier dans le contexte des efforts de réduction des émissions de GES. Nous présentons ci-dessous quatre cas particulièrement pertinents pour le Canada.

3.1/Royaume-Uni

Cadre institutionnel

Climate Change Committee (CCC) [Comité des changements climatiques] : Le principal organisme chargé de coordonner la maintenance, l'utilisation et le développement de différents modèles de systèmes énergétiques au Royaume-Uni est le Climate Change Committee (CCC). Le CCC a été officiellement créé en décembre 2008 en vertu de la Climate Change Act (CCC, 2008) [Loi sur les changements climatiques]. En tant qu'organisme indépendant, le CCC a reçu le mandat suivant :

Prodiguer des conseils concernant le niveau approprié des bilans de carbone au Royaume-Uni ainsi que les étapes nécessaires pour les atteindre, suivre les progrès accomplis dans la réalisation des bilans de carbone et recommander des mesures pour maintenir les bilans sur la bonne voie, effectuer une analyse indépendante des sciences, de l'économie et des politiques relatives au climat et s'engager avec un large éventail d'organismes et de personnes en vue de promouvoir la compréhension et informer les débats fondés sur des données probantes concernant les changements climatiques et leurs impacts, ceci afin de soutenir la prise de décisions solidement étayées (CCC, 2014).

La majorité des membres du CCC sont des professeurs d'université, ce qui assure un lien entre ce comité et la communauté universitaire au sein de laquelle se déroulent la plupart des activités de modélisation des systèmes énergétiques au Royaume-Uni. Cela inclut le Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment [Institut de recherche Grantham sur les changements climatiques et l'environnement], lequel possède des bureaux au Imperial College, à la London School of Economics (LSE) et à l'Université de Cambridge. Il est cependant important de souligner que le CCC ne joue qu'un rôle consultatif, les décisions finales étant prises par le Parlement. Le CCC a été financé par le Department of Energy and Climate Change (DECC) [Ministère de l'énergie et des changements climatiques] et les administrations déléguées (CCC, 2010b).

Pour s'acquitter de ces tâches, le CCC exploite des modèles énergétiques qu'il a lui-même développés, même si il peut également utiliser des modèles développés et gérés par d'autres organismes ou mandater des organismes pour effectuer le travail de modélisation.

Department for Business, Energy and Industrial Strategy (DBEIS) [Ministère du Commerce, de l'Énergie et de la Stratégie industrielle], anciennement DECC : Le CCC a été créé dans le cadre du DECC, lequel est devenu le Department for Business, Energy and Industrial Strategy (DBEIS) en juillet 2016. Le Royaume-Uni a été l'un des premiers pays à intégrer les problèmes relatifs aux changements climatiques et à l'énergie au sein d'un ministère. Le DBEIS publie chaque année des projections sur la consommation énergétique et les émissions de GES pour le Royaume-Uni, en fonction des hypothèses de croissance économique future, de la population du Royaume-Uni, des coûts de production de l'électricité, du prix des combustibles fossiles et d'autres variables clés régulièrement mises à jour (DBEIS, 2017). Le DBEIS a également développé ce que l'on appelle le " Low Carbon Transition Plan " [Plan de transition vers une économie à faible teneur en carbone] pour fournir des bilans de carbone mandatés par le gouvernement (Lockwood, 2013), une mesure présentée plus en détails ci-dessous. Bien qu'il effectue ses propres activités de modélisation pour la mise en œuvre de ce plan, il prend également en compte les travaux du CCC.

Collecte et gestion des données

La principale source des données sur l'énergie au Royaume-Uni est le Digest of UK Energy Statistics [Recueil sur les statistiques énergétiques du Royaume-Uni], également connu sous le nom de DUKES (DBEIS, 2017). Il est géré

par le DBEIS et mis à jour et publié chaque année; il offre un portrait sectoriel approfondi et détaillé de la production et de la consommation d'énergie au cours des cinq dernières années. Les ensembles de données, qui remontent à 1970, sont accessibles gratuitement sur le site Web du gouvernement britannique.

Modèles énergétiques et climatiques existants

Hall et Buckley se sont livrés à un examen approfondi des modèles de systèmes énergétiques utilisés au Royaume-Uni (Hall et Buckley, 2016). Le modèle énergétique du DECC, le premier modèle prévisionnel mis en œuvre par le gouvernement britannique (AEA, 2011), est un modèle descendant destiné à soutenir diverses initiatives politiques, notamment les décisions relatives aux niveaux cibles officiels du bilan de carbone (DECC, 2015). D'autres méthodes de modélisation ont été prises en compte par le CCC en vue d'effectuer une analyse de haut niveau des avenues permettant d'atteindre les objectifs de réduction des émissions de CO₂ domestiques aux niveaux correspondants aux objectifs fixés. Les méthodes descendantes comprennent le modèle d'équilibre général de Her Majesty's Revenue and Customs (HMRC) [Revenu et douanes de Sa Majesté] et le modèle macroéconomique de Cambridge Econometrics (CCC, 2010a). Les méthodes ascendantes incluent le MARKAL-UK ainsi que les scénarios ascendants développés par le CCC (CCC, 2010a).

Utilisation de modèles énergétiques et climatiques dans la prise de décisions

L'une des utilisations les plus claires et les plus importantes de la modélisation dans les politiques énergétiques et climatiques du Royaume-Uni est sa contribution à la définition des bilans de carbone. Dans son premier rapport de 2008, le CCC a recommandé les trois premiers bilans de carbone pour la période 2008-2022. Ses propositions ont été facilement adoptées par le gouvernement britannique en 2009. Bien que l'accord sur la proposition du CCC pour un quatrième bilan de carbone (pour la période 2023-2027) n'a pas été aussi facile à conclure (Lockwood, 2013), il a néanmoins été adopté en 2011.

Selon Lockwood, le débat politique féroce qu'a suscité l'adoption du quatrième bilan de carbone démontre la valeur de la Climate Change Act : « [...] il est fort probable que sans une loi fixant des objectifs à long terme et une institution comme le Climate Change Committee pour la soutenir, un bilan de carbone pour les années 2020 n'aurait jamais été accepté par le gouvernement » (p. 1346).

Le niveau des émissions du quatrième bilan de carbone a été fixé, et les moyens de l'atteindre déterminés, à l'aide du Modèle énergétique du DECC et du MARKAL-UK (CCC, 2010a), ce qui démontre l'importance de la modélisation dans la prise de décisions. La recommandation du CCC dans le cadre du quatrième bilan de carbone pour la réforme du marché de l'électricité, basée elle aussi sur la modélisation, comprenait la décarbonisation de l'approvisionnement en électricité, la sécurité de l'approvisionnement et la réduction des coûts pour les consommateurs. Le gouvernement britannique a mis en œuvre cette réforme du marché de l'électricité en 2013 (Gouvernement du Royaume-Uni, 2013).

Au-delà de l'utilisation de la modélisation des systèmes énergétiques dans le processus décisionnel, le Royaume-Uni a développé une approche novatrice pouvant servir d'outil éducatif pour le grand public. Le 2050 Energy Calculator [Calculatrice énergétique 2050] permet à quiconque de créer sa propre avenue énergétique pour le pays et de considérer les choix et les compromis que celle-ci implique (UK-DECC, 2013a). Il permet au public de se poser la question fondamentale qui consiste à déterminer de quelle façon le Royaume-Uni pourrait le mieux répondre à ses besoins énergétiques tout en réduisant ses émissions par l'entremise (i) d'un outil Internet, (ii) d'un jeu de simulation simplifié intitulé My2050 et (iii) de la version Excel complète pour les spécialistes qui veulent consulter le modèle sous-jacent (UK-DECC, 2013b)^{vi}.

3.2/Suède

Cadre institutionnel

L'Agence suédoise de l'énergie (ASE) et l'Agence suédoise de protection de l'environnement (ASPE) sont responsables de la politique énergétique de la Suède et de la modélisation du système énergétique suédois. Les deux organismes relèvent du Ministère de l'Environnement et de l'Énergie.

^{vi} Le 2050 Energy Calculator est disponible sur Internet à l'adresse suivante : <http://2050-calculator-tool.decc.gov.uk/#/home>. Le jeu de simulation peut être trouvé à l'adresse <http://my2050.decc.gov.uk> et la feuille de calcul électronique Excel à l'adresse <https://www.gov.uk/government/publications/2050-pathways-calculator-with-costs>.

L'ASPE a la responsabilité principale de développer la politique environnementale et sa mise en œuvre (ASPE, 2017), en élaborant des prévisions de scénarios environnementaux avec l'aide de son agence sœur, l'ASE (AIE, 2013). Elle est également chargée de produire le *Rapport pour la Suède sur l'évaluation des progrès escomptés*, qui est soumis tous les deux ans au Parlement européen (ASPE, 2015a). De son côté, l'ASE est responsable de la mise en œuvre de la politique énergétique et réalise, entre autres, des prévisions et des projections modélisées informatiquement concernant l'énergie et l'environnement ainsi que des analyses politiques connexes. Tous les deux ans, elle produit une analyse de scénario à long terme qui constitue le fondement des rapports climatiques présentés à l'UE (Agence suédoise de l'énergie, 2014b). De plus, l'ASE gère la branche suédoise du Système européen d'échange d'émissions.

L'ASE a soutenu les activités de recherche dans le domaine des systèmes énergétiques depuis les années 1970 avec deux objectifs principaux : “ assurer un niveau de compétence pour répondre aux besoins futurs et créer des avantages directs pour les décideurs ” (Agence suédoise de l'énergie, 2014a). Elle a ainsi soutenu plus de 70 thèses de doctorat par l'entremise d'un programme dédié à la recherche énergétique. Des efforts sont clairement consentis pour conserver ces connaissances et cette expertise en Suède : plus de la moitié de ces chercheurs ont continué à travailler dans des universités et des instituts suédois, tandis que le reste a été embauché dans d'autres secteurs du “ système énergétique suédois ” (par ex. l'ASE, le Conseil de recherche suédois, des sociétés d'experts-conseil en énergie, etc.).

En 2014, le ministère de l'Environnement et de l'Énergie (ministère de l'Environnement et de l'Énergie, 2014) a chargé l'ASE et l'ASPE de comparer l'expérience suédoise avec les efforts déployés ailleurs pour réaliser des modélisations de l'économie climatique, soit dans les autres pays nordiques, ainsi qu'en Allemagne et au Royaume-Uni. Cet exercice a permis de formuler les recommandations suivantes : améliorer la coopération entre les organismes concernés en matière de développement de modèles à long terme et assurer une plus grande transparence ainsi qu'un leadership général pour l'évaluation des instruments politiques utilisés dans le cadre des politiques climatiques.

En 2010, un comité parlementaire spécial (Miljömålsberedningen, 2016a) a été formé pour examiner les enseignements spécifiques que la Suède pourrait tirer des efforts consentis par le Royaume-Uni en matière de politique énergétique et climatique (Miljömålsberedningen, 2016b). Il a conclu que les efforts de modélisation ambitieux du Royaume-Uni, qui impliquent l'analyse détaillée des différents secteurs économiques pour évaluer les possibilités de réduction des émissions, étaient exemplaires. L'importance du rôle de coordination du CCC du Royaume-Uni a été particulièrement soulignée : “ de nombreuses analyses différentes nécessitent un rôle de coordination qui les traduit et les synthétise en une base globale servant à la prise des décisions ” (Miljömålsberedningen, 2016c : 402).

Collecte et gestion des données

L'Agence suédoise de l'énergie est responsable des statistiques officielles concernant l'approvisionnement et l'utilisation de l'énergie, les bilans énergétiques et l'évolution des prix de l'énergie (Agence suédoise de l'énergie, 2017). Elle a compilé toutes les statistiques disponibles en matière d'énergie dans un rapport public intitulé *Energiläget* (Situation énergétique) chaque année depuis 1970.

Modèles énergétiques et climatiques existants

Le gouvernement suédois utilise deux principaux modèles climatiques/énergétiques/économiques pour analyser les politiques énergétiques et climatiques (2015b). Le premier est le Modèle économique environnemental à moyen terme (MEEM), développé et géré par l'Institut national de recherche économique (2017). Il s'agit d'un modèle descendant d'équilibre général qui sert principalement à analyser les politiques (Östblom, 1999). Le deuxième modèle, MARKAL-Nordic, est un modèle de système énergétique ascendant qui est utilisé pour développer des scénarios de consommation d'énergie. Le MEEM se concentre sur l'interaction entre l'économie et l'environnement, alors que le modèle MARKAL-Nordic cible l'interaction entre l'énergie et l'environnement (Riekkola, 2015). Parallèlement à d'autres, ces modèles ont été utilisés pour produire le *Rapport pour la Suède sur l'évaluation des progrès escomptés* soumis au Parlement européen en mars 2015 (ASPE, 2015a).

Utilisation de modèles énergétiques et climatiques dans la prise de décisions

Les résultats de la modélisation du système énergétique produits par l'ASE et l'ASPE orientent les décisions prises par le gouvernement en vue d'atteindre les objectifs suédois de réduction des émissions et d'autres objectifs stratégiques liés au climat.

En 2011, le gouvernement suédois a chargé l'ASPE de produire une feuille de route pour atteindre un objectif “ zéro émissions nettes ” d'ici 2050, en prenant en compte diverses trajectoires d'émissions dans différents

secteurs économiques (ASPE, 2012). Ce mandat devait être réalisé en collaboration avec l'ASE et d'autres autorités nationales, dont l'Institut national de recherche économique, le Conseil national de l'habitation, du bâtiment et de la planification et l'Agence suédoise des transports. Diverses méthodes de modélisation ont été utilisées dans les différents secteurs considérés. Par exemple, le modèle MARKAL-Nordic a été utilisé pour identifier la stratégie la plus rentable permettant de développer le système énergétique suédois de 2050 pour les secteurs du chauffage électrique et centralisé (AIE, 2013; Profu, 2012). Plus tard en 2014, un Comité multipartite sur les objectifs environnementaux a été nommé pour engager un « large dialogue politique » sur la façon de concevoir un cadre politique en matière de climat, en tenant compte des résultats de la feuille de route 2050 mentionnée ci-dessus, et pour effectuer ses propres travaux de modélisation (Gouvernement suédois, 2016b). L'utilisation de la modélisation a été cruciale pour construire un large consensus au sein du Parlement suédois (Gouvernement suédois, 2016a). Bien qu'il soit trop tôt pour dire comment ces recommandations seront utilisées dans le processus de prise de décisions, il semble y avoir une importante volonté politique dans le gouvernement de continuer à utiliser la modélisation pour déterminer la manière la plus efficace pour la Suède d'atteindre ses objectifs de réduction des émissions.

L'ASE et l'ASPE préparent également le *Rapport pour la Suède sur l'évaluation des progrès escomptés* présenté tous les deux ans au Parlement européen. Le dernier rapport, publié en 2015, présente des projections quinquennales d'émissions entre 2015 et 2035 en se fondant sur l'analyse des politiques et des mesures adoptées par le Parlement suédois jusqu'en 2014 (ASPE, 2015a). Pour établir ces projections, différents modèles sont utilisés pour chaque sous-secteur du système énergétique afin d'estimer la consommation d'énergie et les tendances d'émission correspondantes.

3.3/Gouvernement fédéral des États-Unis

Les États-Unis qui, comme le Canada, disposent d'un système de gouvernement fédéraliste, proposent un certain nombre de points de vue importants sur la manière d'impliquer la modélisation des systèmes énergétiques dans la prise de décisions. Les institutions qui ont été établies aux É.-U. pour faire avancer la modélisation des systèmes énergétiques sont examinées ci-dessous. L'Energy Modelling Forum (EMF) [Forum sur la modélisation énergétique], un partenariat novateur entre le gouvernement, le monde universitaire et le secteur privé, est ensuite présenté.

Cadre institutionnel

Department of Energy (DOE) [ministère de l'Énergie] : Le DOE joue un rôle important dans le développement des politiques énergétiques et la mise en œuvre du portefeuille de recherche et de développement énergétique du gouvernement fédéral américain. Sa mission consiste à assurer la sécurité et la prospérité du pays en s'attaquant à ses enjeux énergétiques, environnementaux et nucléaires à l'aide de solutions scientifiques et technologiques transformatrices. Le DOE n'a été créé qu'en 1977 dans le but de soutenir, entre autres, la Federal Energy Administration [Administration fédérale de l'énergie], l'Energy Research Development Administration [Administration de la recherche et du développement de l'énergie] et la Federal Power Commission [Commission fédérale de l'énergie]. Il est finalement responsable de l'Energy Information Administration [Administration des informations énergétiques] et du système des laboratoires nationaux.

Energy Information Administration (EIA) : L'EIA a été établie en 1977, en tant que département du DOE, dans le but de comprendre les implications de l'embargo mondial sur le pétrole. L'EIA est aujourd'hui une agence au sein du DOE; elle recueille, analyse et diffuse des informations énergétiques indépendantes et impartiales de haute qualité et possède et développe un certain nombre d'outils de modélisation. Située à Washington, DC, l'EIA compte environ 370 employés fédéraux et disposait, pour l'exercice 2016, d'un budget annuel de 122 millions de dollars. L'EIA conserve les statistiques énergétiques globales de l'État dans le State Energy Data System (SEDS) [Système national de données énergétiques], ce qui permet une enquête comparative sur la production, la consommation, les prix et les dépenses d'énergie dans les différents États. Toutes les données et les analyses sont disponibles gratuitement en temps opportun sur son site Internet. L'approche de l'EIA en matière de collecte/gestion des données et son portefeuille de modèles énergétiques et climatiques sont présentés plus en détail ci-dessous.

Laboratoires nationaux du DOE : Un des éléments clés pour la réalisation de la mission du DOE, c'est le système de 17 laboratoires nationaux et centres technologiques supervisés par le ministère. Avec des capacités qui couvrent les besoins des domaines de mission du DOE, comme l'informatique et les accélérateurs de haute performance, les laboratoires nationaux sont essentiels au succès de la mission du DOE pour l'ensemble de ses responsabilités et au-delà. Ce sont des centres de recherche et développement financés par le gouvernement fédéral qui sont conçus pour répondre à des besoins spéciaux à long terme qui ne peuvent être satisfaits aussi efficacement par des entités

gouvernementales ou privées seules (DOE, 2017 : 9-10). Les laboratoires nationaux sont tenus de maintenir un bon niveau d'expertise dans des domaines critiques pour l'intérêt national, de fonctionner avec objectivité et un degré élevé d'autonomie et d'assurer une capacité de répondre aux différentes situations avec rapidité et souplesse.

Energy Modelling Forum (EMF) : L'EMF a été créé à Stanford en 1976 pour rassembler des spécialistes et des décideurs de premier plan provenant du gouvernement, de l'industrie, des universités et d'autres organismes de recherche afin de se pencher sur d'importants problèmes liés à l'énergie et à l'environnement (Huntington et al., 1982). Sa mission consiste à améliorer l'utilisation des modèles de politique énergétique et environnementale dans le cadre de la prise de décisions importantes au sein des entreprises et du gouvernement (i) en exploitant les capacités collectives de plusieurs modèles, (ii) en expliquant les forces et limites d'approches concurrentes pour un problème donné et (iii) en fournissant des conseils pour l'orientation des futurs efforts de recherche (EMF, 2017). Le fonctionnement de l'EMF se fonde sur les quatre principes directeurs suivants :

- (i) L'impartialité – une technologie, une politique ou une perspective énergétique n'est pas favorisée par rapport à une autre;
- (ii) La prise en compte des besoins de l'utilisateur – les modèles ne peuvent pas améliorer les décisions s'ils ne répondent pas à la bonne question;
- (iii) La divulgation – la “ vérité dans la modélisation ” découle de la divulgation plutôt que de la dissimulation des hypothèses, paramètres, jugements et sujets sensibles importants; et
- (iv) La compréhension – les connaissances sur la manière dont les marchés fonctionnent sont beaucoup plus précieuses que les résultats numériques précis (EMF, 2017).

Des groupes de travail ad hoc, organisés autour d'un projet spécifique relatif à l'énergie, constituent le cœur de l'EMF. Chaque groupe de travail développe un modèle d'étude destiné à analyser et comparer différents modèles. Ces groupes de travail ne tentent pas de créer un consensus mais visent plutôt à mettre en évidence les raisons pour lesquelles les spécialistes ne sont pas d'accord, chaque groupe publiant un rapport de synthèse et un document technique complémentaire. L'EMF intègre les résultats dans les débats politiques grâce à la participation du personnel du gouvernement aux activités de l'EMF et au témoignage du personnel de l'EMF au Congrès. Les sociétés participantes aident à cadrer les questions de recherche et apprennent également à connaître les nouveaux problèmes techniques. Enfin, l'EMF soutient les étudiants diplômés afin qu'ils poursuivent leurs recherches sur des problèmes énergétiques et environnementaux dans la communauté universitaire, même s'il ne propose pas de diplômes formels (Fawcett et al., 2015).

Collecte et gestion des données

Energy Information Administration (EIA) : L'EIA présente deux caractéristiques uniques qui facilitent la collecte et la gestion des données. Premièrement, ses données, analyses et prévisions sont, de par la loi, indépendantes de l'approbation de tout autre agent du gouvernement. Une telle indépendance a sans doute permis à l'EIA d'établir la confiance des fournisseurs de données. Plus précisément, l'EIA a le droit légal de recueillir des données énergétiques ainsi que l'obligation légale de les protéger. Deuxièmement, c'est le seul organisme de l'agence fédérale qui effectue réellement des analyses. Il produit des projections reconnues, qui comprennent des perspectives énergétiques à court terme, annuelles et internationales, qui sont publiées régulièrement et réputées pour présenter des perspectives opportunes qui font autorité en matière d'énergie. Ce cercle vertueux entre la collecte et l'analyse des données énergétiques permet d'obtenir des améliorations mutuelles aussi bien dans la collecte que l'analyse des données. Le programme de collecte des données de l'EIA couvre l'ensemble des sources énergétiques, des utilisations finales et des flux d'énergie, y compris le charbon, le pétrole, le gaz naturel, l'électricité ainsi que l'énergie renouvelable et nucléaire.

Modèles énergétiques et climatiques existants

Energy Information Administration (EIA) : L'EIA utilise divers modèles pour établir ses différentes perspectives énergétiques; la perspective énergétique à court terme utilise le Modèle énergétique régional à court terme, ou RSTEM (EIA, sans date). Ce modèle repose sur des relations économétriques estimées entre l'offre, les stocks, les prix et la demande pour prévoir les résultats du marché de l'énergie, un à deux ans à l'avance, pour des secteurs clés et dans neuf régions des États-Unis. La perspective énergétique annuelle est élaborée à l'aide du National Energy Modelling System (NEMS) [Système national de modélisation de l'énergie] qui est un modèle d'équilibre économique-énergétique visant à saisir différentes interactions des changements économiques et de l'offre, de la demande et des prix de l'énergie, avec un horizon de projection d'avenir d'environ 25 ans (EIA, 2009; Gabriel et al., 2001). Le NEMS peut également être utilisé pour étudier l'impact de nouveaux programmes et politiques énergétiques. Il

est important de noter qu'il s'agit d'un modèle régional; cependant, la ventilation régionale pour chaque module reflète la disponibilité des données ainsi que les régions jugées les plus utiles pour l'analyse des politiques. Enfin, la perspective énergétique internationale de l'EIA utilise le modèle du World Energy Projection System Plus (WEPS+) [Système mondial de projection énergétique plus] de l'EIA (EIA, 2016: 273-274). Celui-ci consiste en un système de modèles énergétiques sectoriels individuels utilisant un processus de solution itérative intégrée qui permet la convergence de la consommation et des prix pour trouver une solution qui soit équilibrée. Il sert à élaborer des projections énergétiques pour des cas de référence et des projections relatives aux énergies de remplacement qui reposent sur différentes hypothèses concernant la croissance du PIB et le prix des combustibles fossiles. Le modèle WEPS+ produit des projections pour 16 régions et/ou pays dans le monde.

Laboratoires nationaux et EMF : De plus, un grand nombre de modèles techniques et techno-économiques en matière d'énergie et de climat sont développés, gérés et utilisés dans les laboratoires nationaux (par ex. le NREL et la NASA) ainsi que dans certaines universités des États-Unis à des fins de recherche et en vue de soutenir les politiques. Une étude récente réalisée par l'Energy Modelling Forum (EMF 24) a comparé la capacité de neuf modèles à modéliser différentes stratégies technologiques en vue d'atteindre les objectifs de la politique climatique (Fawcett et al., 2015). Voir à ce sujet le Tableau A1 en annexe. En général, les modèles différaient par l'ampleur de leur couverture, leur résolution géographique, leurs choix technologiques et leurs projections ainsi que par les hypothèses qu'ils formulaient concernant la disponibilité des technologies d'émissions négatives, telles que le captage et stockage du CO₂ (CSC) à l'aide de la bioénergie.

Utilisation de modèles énergétiques et climatiques dans la prise de décisions

Aux États-Unis, les modèles sont utilisés à différents niveaux dans la prise de décisions. Par exemple, le National Energy Modelling System (NEMS) est régulièrement utilisé pour effectuer des analyses spéciales à la demande de fonctionnaires et d'organismes gouvernementaux qui fournissent généralement des scénarios spécifiques et des hypothèses pour l'analyse (EIA, 2009 : 2-3). Ils ont inclus le marché de l'énergie et les répercussions économiques connexes de l'American Clean Energy and Security Act [Loi américaine sur l'énergie propre et la sécurité] de 2009 et la Lieberman-Warner Climate Security Act [Loi sur la sécurité climatique Lieberman-Warner] de 2007.

Afin d'assurer une prise de décisions plus éclairées, la Quadrennial Energy Review (QER) [Revue énergétique quadriennale] a été instaurée par l'administration Obama en vue de permettre au gouvernement fédéral de traduire les objectifs de la politique en un ensemble d'actions intégrées fondées sur l'analyse – des actions exécutives, des propositions législatives ainsi que des exigences en matière de budgets et de ressources pour des investissements proposés – sur un horizon de planification de quatre ans. Grâce aux connaissances scientifiques, à la technologie et à l'expertise analytique disponibles au sein du Système des laboratoires nationaux, le premier rapport du QER, s'intéressant aux infrastructures nationales de transmission, de stockage et de distribution de l'énergie, a été publié en 2015 (QER, 2015), alors que le second rapport, axé sur le système électrique national, de la génération à l'utilisation finale, a été publié en 2017 (QER, 2017).

3.4/Californie

Cadre institutionnel

La Californie permet d'observer de quelle manière la modélisation énergétique et climatique est entreprise dans une administration infra-fédérale. En raison des efforts précoces de la Californie pour lutter contre la pollution atmosphérique, l'État a obtenu un statut privilégié en vertu de la Clean Air Act [Loi sur la pureté de l'air] de 1970, ce qui lui a permis de mettre en œuvre des règlements plus rigoureux que ceux du gouvernement fédéral en matière de pollution atmosphérique produite par les véhicules (Berck et al., 2010; Corman, 2004; Hanemann, 2007). Les normes de pollution atmosphérique de la Californie sont au cœur de sa stratégie climatique globale (Mendelson, 2008). Les efforts de la Californie pour réduire ses émissions aux niveaux de 1990 d'ici 2020 sont bien connus (Mazmanian et al., 2008; Mazmanian et al., 2013) et comprennent l'adoption d'un système de plafonnement et d'échange ainsi que des règlements, tels que des normes d'émission des véhicules. Cependant, la législature de l'État de la Californie s'est récemment engagée à réduire les émissions de 40 % par rapport aux niveaux de 1990 d'ici 2030 (Siders, 2016).

L'autonomie relative dont jouit la Californie dans le système fédéral américain permet d'expliquer la solidité et la capacité fonctionnelle de ses organismes en ce qui concerne la mise en œuvre de politiques énergétiques et climatiques dans cet État, c'est-à-dire la California Energy Commission (CEC) [Commission de l'énergie de la Californie]

et le California Air Resources Board (CARB) [Conseil des ressources atmosphériques de la Californie]. La CEC est responsable de la publication semestrielle de l'*Integrated Energy Policy Report* (IEPR) [*Rapport sur la politique énergétique intégrée*], alors que le CARB met à jour tous les cinq ans un Plan d'établissement de la portée des incidences des changements climatiques (PEPICC). Les mandats des deux organismes sont devenus de plus en plus étroitement liés alors que le plus récent IEPR affirme que « la lutte contre les changements climatiques constitue le fondement de la politique énergétique de la Californie » (CEC, 2015 : 8).

Collecte et gestion des données

Grâce à sa Division des évaluations énergétiques, la CEC recueille des données liées à l'énergie et réalise des enquêtes et des évaluations des systèmes et tendances énergétiques de la Californie tout en renforçant sa capacité interne d'analyse et de modélisation (CEC, 2017). Le Bureau d'analyse de l'offre recueille des données, produit des analyses et fournit une expertise en matière de politiques sur un large éventail de problèmes liés à l'approvisionnement énergétique, y compris les marchés et infrastructure qui fournissent de l'énergie à la Californie. Le Bureau est composé d'ingénieurs, d'économistes et d'autres scientifiques qui proposent une vision multidisciplinaire du secteur de l'énergie en Californie. Le Bureau d'analyse de la demande fournit des prévisions sur la demande d'énergie en recueillant et analysant les données sur la demande et la consommation de pointe de l'électricité, la consommation de gaz naturel et l'utilisation du carburant pour le transport. Le personnel des ingénieurs, économistes et statisticiens s'appuie également sur les informations recueillies et utilise des enquêtes pour mieux comprendre les comportements des Californiens en matière d'énergie et l'utilisation finale que ceux-ci en font.

Le CARB est le principal intendant de l'inventaire des émissions de GES en Californie (CARB, 2017). Ses données principales proviennent des rapports soumis au Conseil en vertu du Regulation for the Mandatory Reporting (MRR) [Règlement sur le signalement obligatoire] des émissions de GES. Le MRR exige des installations et des entités comptabilisant plus de 10 000 t équivalent CO₂ de combustion et d'émissions des procédés, de toutes les installations appartenant à certaines industries ainsi que de toutes les entités productrices d'énergie électrique qu'elles déposent un rapport annuel de données sur les émissions de GES directement au CARB. Les rapports provenant d'installations et d'entités qui émettent plus de 25 000 Mt.éq.CO₂ sont vérifiés par un organisme de vérification tiers accrédité par le CARB.

Modèles énergétiques et climatiques existants

Le CARB utilise des modèles ascendants et descendants pour évaluer les options stratégiques destinées à réduire les émissions dans tous les secteurs de l'économie de la Californie, soit Energy 2020 (ascendant) et E-DREAM (descendant) (CARB, 2010; E3, 2017). En outre, la CEC et la California Public Utilities Commission (CPUC) [Commission des services publics de la Californie] ont utilisé le modèle PATHWAYS pour développer plusieurs scénarios permettant de faire varier la combinaison des technologies à faible émission de carbone et le calendrier de déploiement (E3, 2017). D'une manière significative, le CARB a également entrepris des exercices de modélisation de son lien avec le Québec en matière de marché du carbone (CARB, 2012), lien qui a également été étudié par la Western Climate Initiative (WCI) [Initiative de l'Ouest sur le climat] (Équipe de modélisation économique de la WCI, 2012).

Utilisation de modèles énergétiques et climatiques dans la prise de décisions

Dans l'IEPR semestriel, la CEC rend compte des tendances et des questions concernant l'électricité et le gaz naturel, les transports, l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables et la recherche sur l'énergie d'intérêt public. L'une des applications les plus importantes de la politique de modélisation des systèmes d'énergie est la production d'un ensemble unique de prévisions dans le contexte de l'IEPR semestriel de la CEC (CEC, 2015 : 138-145). Il se compose de prévisions et de projections de base visant des Additional Achievable Energy Efficiency savings (AAEE) [économies supplémentaires réalisables grâce à une plus grande efficacité énergétique]. Une AAEE est un scénario prévisionnel illustrant les économies découlant de l'efficacité énergétique jugées susceptibles de se produire dans un avenir prévisible, ceci comprenant les impacts des politiques qui seront mises en œuvre dans le futur. L'ensemble de prévisions constitue la base d'une prévision gérée pour être utilisée à des fins de planification au cours de l'année suivante par la CEC, la CPUC et le California Independent System Operator (CAISO) [Opérateur du système indépendant de la Californie]. Les prévisions concernant l'électricité et le gaz naturel sont utilisées dans divers processus de planification visant à faire en sorte que les consommateurs californiens puissent compter sur un approvisionnement énergétique adéquat à des prix raisonnables. La CEC s'est associée à la CPUC et au CAISO pour former une équipe technique visant à harmoniser les processus inter-organismes afin de pouvoir discuter de questions techniques et améliorer la coordination de la planification des infrastructures (CEC, 2015 : 130).

En vertu de la Global Warming Solutions Act [Loi sur les solutions à apporter au réchauffement climatique] de 2006, connue sous le nom de Assembly Bill 32 (AB-32) [Projet de loi 32], la Californie est tenue de développer un PEPICC complet afin “ d’identifier et formuler des recommandations sur les mesures directes visant la réduction des émissions, les mécanismes de conformité alternatifs, les mécanismes de conformité basés sur le marché et les incitatifs monétaires et non monétaires potentiels ” dans le but d’atteindre l’objectif visé de réduction des émissions de la Californie en 2020. Elle est également tenue d’effectuer “ le maximum de réductions d’émissions de GES techniquement réalisables et rentables ” (Núñez, Chapitre 488, Lois de 2006 : s38560, 38561(b)). Un premier PEPICC a été adopté en 2008 (CARB, 2008) en vertu de l’AB-32; il doit être mis à jour au moins tous les cinq ans. La mise à jour la plus récente, présentée au début de 2017, propose une stratégie pour atteindre l’objectif de réduction des émissions de la Californie en 2030 (CARB, 2017). Le PEPICC de 2008 reposait quant à lui sur des modèles économiques (CARB, 2008 : 73-80). Plus important encore, dans le but d’évaluer les impacts économiques du PEPICC, la CARB a comparé l’activité économique estimée dans un cas de statu quo aux résultats obtenus lorsque les actions recommandées dans le PEPICC sont mises en œuvre. Le cas de statu quo représente les émissions prévues à l’échelle de l’État avec les politiques et programmes existants, mais sans mesure additionnelle pour réduire les émissions. Concrètement, le cas de statu quo a été établi à l’aide des prévisions du California Department of Finance [Ministère des finances de la Californie], de la California Energy Commission et du modèle E-DRAM. Afin d’étudier les impacts économiques du système de plafonnement et d’échange, la Californie et d’autres administrations partenaires de la WCI ont conclu un contrat avec ICF International et Systematic Solutions Inc. (SSI) pour la réalisation d’analyses économiques à l’aide d’ENERGY 2020, un modèle énergétique multisectoriel et multirégional.

4/Les principes clés de la modélisation des systèmes énergétiques

Notre examen des pratiques exemplaires de modélisation des systèmes énergétiques du Royaume-Uni, de la Suède, du gouvernement fédéral des États-Unis et de la Californie dégage les principes des pratiques exemplaires de modélisation des systèmes énergétiques.

4.1/La transparence : des données et une modélisation ouvertes

Les pays ayant fait l'objet d'une étude de cas montrent une évolution constante vers les données et la modélisation ouvertes. Premièrement, l'accès à des données de grande qualité, détaillées et à jour est d'autant plus essentiel à une modélisation fiable que les exigences d'information pour la modélisation des systèmes énergétiques et la gestion des réseaux électriques intelligents augmentent. Les résultats d'une modélisation ne seront jamais meilleurs que les données sur lesquelles elle se base : « mauvaises informations, mauvaises conclusions ». L'accent devrait être mis sur l'amélioration de l'acquisition de données jusqu'à des niveaux institutionnels adéquats. Nous avons également constaté que la collecte et la mise à disposition de telles données incombe à une seule et unique agence au Royaume-Uni, en Suède et aux États-Unis. La complémentarité entre institutions fédérales et infra-fédérales n'est pas non plus à négliger, comme le montre la collecte d'informations ayant trait à l'énergie effectuée par la California Energy Commission pour alimenter ses efforts de modélisation. Il faut insister sur le fait que chaque organisation en charge des données devrait avoir le droit légal de les collecter et l'obligation légale de les protéger, ce qui apparaît peut-être le plus clairement dans le cas de l'EIA. Enfin, il est également important que ces données soient accessibles au public, ce qui non seulement facilite l'analyse par modélisation, mais garantit en outre l'imputabilité devant la population. Par exemple, toutes les informations recueillies par l'EIA sont par défaut publiques, et les fournisseurs de données ne peuvent que dans des cas dûment justifiés les soustraire au regard de la population.

Nous avons également observé une tendance à la modélisation ouverte, en particulier dans le cas du 2050 Energy Calculator au Royaume-Uni. Disponible en différents niveaux de complexité (pour les néophytes, pour ceux qui ont une connaissance générale, aussi bien que pour les spécialistes techniques, qui ont accès à l'ensemble des feuilles de calcul), le 2050 Energy Calculator présente un degré sans équivalent de transparence du processus de modélisation. Une telle approche a l'avantage de rendre convivial un modèle sophistiqué, avec à l'appui une vaste documentation pour valider des hypothèses et approfondir la compréhension.

4.2/La confiance : un forum sur la modélisation pour la discussion, la validation et la comparaison

Afin que les décideurs politiques, la société civile et le secteur privé fassent confiance aux résultats de la modélisation, ses méthodes et ses conclusions doivent être ouvertement discutées, validées et comparées avec un degré élevé de rigueur académique. Les modèles doivent être testés et comparés pour s'assurer que les résultats qu'ils produisent soient satisfaisants. En fait, disposer d'une masse critique de modèles dont les extrants sont similaires les uns aux autres renforce la confiance dans les résultats du modèle. Le meilleur exemple d'une telle institution est sans contredit l'Energy Modelling Forum (EMF) aux États-Unis, bien que des comparaisons de modèles aient également été réalisées au Royaume-Uni et en Suède.

4.3/La durabilité : une infrastructure de connaissances spécialisée

Les activités de modélisation sont bien plus que de simples équations mathématiques. Elles comprennent aussi l'analyse et la validation de données qui requièrent une expertise humaine et une puissance de calcul considérable. Les modèles énergétiques ne sont jamais développés de façon isolée; ils requièrent des contextes formels et informels pour que les experts puissent discuter entre eux des méthodes, mieux comprendre les nouvelles technologies et l'évolution des politiques, et bâtir un dialogue entre diverses disciplines universitaires.

L'infrastructure de connaissances doit également comporter un dialogue avec les décideurs politiques, la société civile et le secteur privé, lequel doit aller dans les deux sens : les experts en modélisation s'efforcent de transmettre leurs découvertes et tendent en retour l'oreille aux besoins et préoccupations de la communauté concernant leurs hypothèses et leurs pratiques de recherche.

Il ne suffit pas de développer les modèles énergétiques et les ensembles de données qui leur sont associés, il faut aussi sans cesse les entretenir, les améliorer et les mettre à jour. À cette fin, une infrastructure spécialisée est nécessaire en termes d'accès aux données, de ressources informatiques et de personnes compétentes pour développer, maintenir et exécuter les modèles. Il est tout aussi important de disposer d'un cadre au sein duquel les techniques et les découvertes en modélisation peuvent être discutées, non seulement entre spécialistes, mais aussi avec les décideurs politiques, la société civile et le secteur privé. Seul un financement continu peut pérenniser une telle structure et prévenir une déperdition des connaissances acquises.

4.4/L'arrimage clair aux politiques : un cadre institutionnel liant modélisation et politiques

Un cadre institutionnel clair liant modélisation des systèmes énergétiques et processus décisionnels en matière énergétique et climatique a été observé au Royaume-Uni, en Suède et en Californie. Le Committee on Climate Change, au Royaume-Uni, est le meilleur exemple de ce type d'institutions. Bien que la modélisation ne soit pas l'unique facteur guidant les choix de politiques publiques, le fait que la modélisation des systèmes énergétiques doive être prise en compte dans le processus décisionnel présente de nombreux avantages. Premièrement, l'imputabilité s'en trouve renforcée, puisque les décideurs politiques doivent intégrer les conclusions de la modélisation dans leur prise de décision. Deuxièmement, des passerelles sont érigées entre modélisateurs et décideurs politiques, élargissant ainsi la compréhension mutuelle de la nature de leurs activités professionnelles respectives. Une plus grande connivence entre modélisateurs et décideurs politiques facilite la communication des incertitudes liées à la modélisation. Enfin, troisièmement, le lien entre modélisation et processus décisionnels permet des mises à jour plus opportunes des politiques et accroît de ce fait leur efficacité.

5/Le contexte canadien

5.1/Le fédéralisme canadien

Le Canada est une fédération au sein de laquelle les responsabilités constitutionnelles sont partagées entre les gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux. Les provinces ont des pouvoirs constitutionnels étendus sur les ressources naturelles et l'environnement dans les limites de leur territoire (Morton, 1996). Le gouvernement fédéral canadien est en charge des affaires interprovinciales et internationales, qui incluent le transport d'énergie (oléoducs interprovinciaux et réseaux électriques) et les normes et règlements d'efficacité énergétique, et il assume la principale responsabilité du soutien à la recherche et au développement.

Au Royaume-Uni, en Suède et en Californie, les organismes gouvernementaux responsables des politiques énergétiques et climatiques sont simultanément en charge de la modélisation et de l'acquisition de données, même si les efforts de la Californie sont soutenus par des agences fédérales, dont l'EIA. La réalité du fédéralisme canadien (détaillée dans le Tableau 1) rend la modélisation concrète des systèmes énergétiques, aussi bien que la conception d'organismes chargés de cette modélisation, plus complexes qu'au sein d'un système unitaire, comme au Royaume-Uni, en Suède et en Californie, non sans aiguïser le besoin des connaissances produites par la modélisation, au niveau tant fédéral que provincial.

Tableau 1 – Répartition des compétences en matière énergétique au Canada

Compétence fédérale	Compétence partagée	Compétence provinciale
• Commerce énergétique international et interprovincial	• Réglementation environnementale des projets énergétiques	• Propriété et gestion des ressources énergétiques
• Infrastructure énergétique internationale et interprovinciale	• Commerce et investissement	• Conception et collecte des redevances
• Réglementation de l'énergie nucléaire et de l'uranium	• Gestion de la sécurité de l'extraction d'uranium	• Extraction de l'uranium
• Ressources énergétiques sur les terres de la couronne fédérale, en mer et au nord du 60 ^e parallèle	• Gestion des accords sur les ressources extracôtières	• Production, distribution et réglementation de l'électricité
• Normes et règlements d'efficacité énergétique	• Efficacité énergétique et recherche et développement scientifique	• Aménagement et utilisation du territoire
		• Lois et réglementations de l'exploration, de la mise en valeur, de la conservation et de l'utilisation de l'énergie

Source : (IEA, 2016: 23)

5.2/Le Conseil de la Fédération

Du fait de l'héritage politique du Programme énergétique national de 1980, le gouvernement fédéral canadien demeure réticent à tout ce qui ressemble à une stratégie énergétique nationale (Doern et al., 2015 : 149). L'annonce en 2015 d'une Stratégie canadienne de l'énergie (CoF, 2015) a donc été confiée au Conseil de la Fédération (CdF), une organisation qui réunit les gouvernements provinciaux. Le Tableau 2 présente les thèmes clés et les axes de travail de cette stratégie. Comme leurs droits dans la gestion des ressources naturelles sont davantage reconnus, les peuples et les organisations représentatives des Premières Nations devront être des partenaires dans l'élaboration de l'avenir énergétique du Canada (Krupa, 2012).

Tableau 2 – Thèmes et axes de travail de la Stratégie canadienne de l'énergie de 2015

Viabilité et conservation	Technologie et innovation	Acheminement de l'énergie
1. Promouvoir l'efficacité énergétique et la conservation de l'énergie. 2. Passer à une économie plus faible en carbone. 3. Améliorer l'information sur l'énergie et la sensibilisation à cet égard.	4. Accélérer le développement et le déploiement de la recherche et des technologies de l'énergie qui favoriseront une production, une transmission et une utilisation plus efficace de sources d'énergie propre et conventionnelle. 5. Élaborer et mettre en œuvre des stratégies visant à répondre aux besoins en ressources humaines du secteur de l'énergie, actuellement et tout au long du XXI^e siècle. 6. Faciliter l'exploitation de sources d'énergie renouvelable, verte et/ou plus propre afin de répondre à la demande future et contribuer aux objectifs et aux priorités sur le plan environnemental.	7. Créer et améliorer un ensemble de réseaux modernes, fiables et sans danger pour l'environnement pour la transmission et le transport de l'énergie à l'échelle canadienne ou pour l'importation et l'exportation. 8. Améliorer la rapidité et la prévisibilité des processus décisionnels et d'approbation réglementaire tout en maintenant des normes rigoureuses de protection de l'environnement et en protégeant l'intérêt public. 9. Favoriser la diversification du marché. 10. Viser la participation officielle des provinces et des territoires aux discussions et aux négociations internationales sur l'énergie.

Source : (CoF, 2015: 9)

5.3/La modélisation des systèmes énergétiques au Canada

Vaillancourt *et al.* (2014) fournissent un portrait à jour de la modélisation des systèmes énergétiques au Canada (Tableau 3). Ils identifient trois principales entités fédérales qui ont entrepris des activités de modélisation : l'Office national de l'énergie (ONE), Environnement et changement climatique Canada (ECCC) et Ressources naturelles Canada (RNCAN). Les modèles qu'elles utilisent servent en général à prévoir les tendances en matière d'énergie et d'émissions de GES. L'ONE a utilisé un modèle hybride, au sein d'un cadre intégré commun, pour prévoir l'offre et la demande en énergie au Canada : le modèle 2020 Energy et le modèle Infometrica (TIM), respectivement. ECCC a eu recours à un cadre de modélisation appelé Modèle énergie-émissions-économie du Canada (E3MC), basé sur le modèle 2020 Energy et sur des modèles internes, pour prévoir l'évolution future des émissions (Environnement Canada, 2014). RNCAN a employé MAPLE-C (Model to Analyze Policies Linked to Energy in Canada), un modèle d'équilibre conçu pour prévoir l'offre, la demande et les émissions énergétiques — bien qu'il ne soit plus utilisé pour fournir des prévisions, la dernière remontant à 2006. À l'échelle internationale, lorsqu'elles produisent des prévisions énergétiques globales, l'EIA et l'AIE tracent également un portrait de la modélisation des systèmes énergétiques au Canada (Vaillancourt *et al.*, 2014).

Bien que les entités gouvernementales susmentionnées se soient dotées d'une certaine capacité de modélisation, celle-ci se limite en général à la production de prévisions reposant sur des codes de modélisation développés et bien souvent gérés par des sociétés d'experts-conseils. Certaines universités canadiennes, et les sociétés d'experts-conseils qui leur sont liées, ont développé des compétences plus avancées en matière de modélisation :

- Le modèle SCMI a été développé par l'Energy and Materials Research Group de l'Université Simon Fraser, avec de nombreuses applications réalisées par la société d'experts-conseils Jaccard and Associates, désormais connue sous le nom de Navius. Le SCMI est un modèle hybride qui combine des approches ascendantes et descendantes (Rivers et Jaccard, 2005).
- Le Canadian Energy Research Institute (CERI) [Institut canadien de recherche énergétique] a développé un module de renouvellement du parc automobile que nous avons baptisé Canada Pathways, semblable au modèle PATHWAYS élaboré en Californie (CERI, 2017-9; Williams *et al.*, 2012a, b).

- Le Canadian Energy Systems Simulator (CanESS) [Simulateur des systèmes énergétiques canadiens] a été mis au point par Whatif? Technologies à Ottawa avec l'aide du Canadian Energy Systems Analysis Research (CESAR) [Recherche sur l'analyse des systèmes énergétiques au Canada], dans le cadre d'une initiative réalisée à l'Université de Calgary (CESAR, 2017a). Le CanESS est, pour le Canada, un modèle de systèmes énergétiques intégré, multi-combustible, multi-sectoriel et ventilé par province qui permet une comptabilisation ascendante de l'offre et de la demande énergétiques (CESAR, 2017a; Fondation familiale Trottier, 2016 : 40). Il est actuellement utilisé dans le cadre Pathways Project du CESAR (2017b).
- Le groupe conseil EnviroEconomics, d'Ottawa, a également utilisé le modèle SCMI, jumelé avec le R-GEEM, lors d'une récente analyse de la contribution canadienne au Deep Decarbonization Pathways Project [Projet d'avenues permettant une profonde décarbonisation] (Sawyer et Bataille, 2016).
- Le modèle canadien d'optimisation MARKAL a d'abord été développé par le Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions (GERAD) à l'Université de Montréal (Loulou *et al.*, 1992), avant d'être mis à jour puis remplacé par une version canadienne du modèle TIMES (Integrated MARKAL-EFOM Systems) (Vaillancourt *et al.*, 2014). Le modèle TIMES actuellement le plus avancé pour le Canada est une composante de la plateforme NATEM (North American TIMES Energy Model) développée par ESMIA Consultants, utilisée dans divers projets d'analyse des politiques (Vaillancourt *et al.*, 2017) et affinée par le biais de projets académiques à l'Université de Montréal (Levasseur *et al.*, 2017). Les générateurs de modèles MARKAL/TIMES sont soutenus par l'Energy Technology Systems Analysis Program [Programme d'analyse des systèmes de technologie énergétique] de l'AIE et utilisés dans quelque 70 pays (ETSAP, 2016).

Le Tableau 3 présente une synthèse de la modélisation de systèmes énergétiques réalisée au Canada. Enfin, il convient de signaler que les rapports prospectifs sur les marchés et le transport du pétrole brut produits par l'Association canadienne des producteurs pétroliers (ACPP) ne reposent pas sur la modélisation, mais plutôt sur des enquêtes menées auprès de ses membres et sur ses propres méthodes de prévision (CAPP, 2015 : 1-2)

Tableau 3 – La modélisation des systèmes énergétiques au Canada

	Instances gouvernementales canadiennes			Universités/sociétés d'experts-conseils canadiennes				
Type de modèle/organisation	Office nationale de l'énergie	Environnement Canada	Ressources Naturelles Canada	Simon-Fraser/ Navius (Vancouver)	CESAR/ Whatif? (Calgary/ Ottawa)	CERI/ CESAR (Calgary)	EnviroEconomics (Ottawa)	Uni. Montréal / ESMIA (Montreal)
Descendant	Modèle Informetrica (TIM)		MAPLE-C	R-GEEM			(R-GEEM)	
Ascendant	Énergie 2020				CanESS			MARKAL / TIMES / NATEM
Hybride		E3MC		CIMS			(CIMS)	MERGE
Stock/flux						Canada-PATHWAYS		

Les modèles présentés ci-dessus ont été mis à contribution dans nombre de récentes initiatives canadiennes de modélisation des systèmes énergétiques et climatiques (ECCC, 2016 : 13-14). Au terme d'une étude datant de 2015, le Conseil des académies canadiennes concluait que le Canada pouvait réduire considérablement ses émissions en ayant recours à des technologies disponibles sur le marché et il en identifiait plusieurs susceptibles de contribuer à de plus importantes réductions. Menée par une équipe de huit experts, cette étude n'entreprend pas de recherche primaire, mais s'efforce plutôt de clarifier des sujets avec lesquels la société civile et le secteur privé ne sont en général pas familiers, ou qu'ils comprennent mal, mais qui sont en revanche largement admis et intégrés par les spécialistes de l'énergie et du climat, en plus d'être étayés par la littérature scientifique (CCA, 2015 : 5). Le Deep Decarbonization Pathways Project (Sawyer et Bataille, 2016) a identifié six avenues de décarbonisation pour le Canada et suggéré que le Canada pouvait réaliser des progrès significatifs en décarbonisant le réseau électrique par

l'usage de sources d'énergie renouvelables et de quelques combustibles fossiles avec CSC, et par le remplacement des sources d'énergie à base de combustion par l'électricité dans plusieurs secteurs. Les réductions d'émissions y étaient encadrées par un train de mesures combinant réglementation des technologies basée sur le rendement et tarification du carbone. À l'aide d'un modèle d'optimisation et d'un modèle de simulation, le Projet Trottier pour l'avenir énergétique (Fondation familiale Trottier, 2016) examine onze scénarios qui conduisent le Canada à différents niveaux de réduction des GES à l'horizon 2050. Les principales avenues de réduction des émissions comprennent l'utilisation élargie d'électricité non émettrice, le recours accru aux biocarburants dans le secteur des transports et l'amélioration de l'efficacité énergétique et des économies d'énergie. Ce rapport indique également que la poursuite de l'objectif d'émissions nettes négatives de GES requiert des recherches plus poussées.

5.4/Les lacunes actuelles dans la modélisation des systèmes énergétiques au Canada

Le manque de soutien à la modélisation ouverte de systèmes énergétiques

Contrairement à d'autres administrations, le Canada ne dispose pas d'un programme qui soutient la modélisation des systèmes énergétiques ou qui l'intègre à l'élaboration des politiques. Bien que la capacité de modélisation du Canada soit bien réelle, elle est éparpillée dans un éventail d'instances gouvernementales, d'instituts de recherche universitaires et de sociétés d'experts-conseils.

Cependant, faute d'un soutien institutionnel, une grande partie de la modélisation des systèmes énergétiques est réalisée au Canada par des sociétés d'experts-conseils privées qui utilisent des ensembles de données et des modèles qui leur sont exclusifs, ce qui ne va pas sans soulever la question du manque de transparence. La confiance accordée aux résultats par la société civile et le secteur privé s'en trouve amoindrie, du fait que les décisions concernant la modélisation, comme les paramètres clés et les hypothèses, sont souvent prises par les seuls spécialistes à même de faire fonctionner le modèle. Tout en reconnaissant l'expertise considérable de ces spécialistes, des préoccupations concernant le " biais d'optimisme " et la " planification erronée " (voir Flyvbjerg, 2013) nous donnent à penser que l'ouverture du processus de modélisation serait bénéfique.

Le manque de données et les efforts modérés de modélisation

La production de l'information sur l'énergie est d'une grande lenteur au Canada, si on la compare aux pratiques exemplaires de collecte et de gestion de données observées dans d'autres administrations. Les deux derniers portraits dressés par l'ONE datent de 2013 et 2016 (ONE, 2016), avec une scénarisation très limitée, tandis que le plus récent de RNCan remonte à 2006 (RNCan, 2006). Ces retards restreignent notablement l'impact de la modélisation sur l'élaboration et l'évaluation des politiques. De manière similaire, les dernières prévisions d'émissions d'Environnement Canada datent de 2014 (ECCC, 2017). Nous savons pourtant que bien des choses peuvent changer en trois ans.

Les données canadiennes sur l'énergie sont également entachées d'incohérences et de lacunes avérées (EMMC, 2012). Moore *et al.* (2012) font remarquer qu'au Canada les données liées à l'énergie sont collectées par une constellation d'agences dont les normes varient et utilisant différents outils d'analyse et d'évaluation, et que les données qui en résultent sont dispersées dans une variété de portails et de points d'accès, souvent avec un retard considérable.

L'absence de cadre de planification liant la modélisation et les politiques climatiques et énergétiques

Bien que la plupart des efforts de modélisation visent à influencer les politiques énergétiques et climatiques au Canada, il leur manque un mécanisme de planification qui les arrimerait au processus décisionnel. Au Royaume-Uni et en Californie, la modélisation est largement utilisée dans les documents de planification énergétique et climatique, apparaissant fréquemment comme un lien entre les deux enjeux politiques. Le Royaume-Uni a développé un Low Carbon Transition Plan très complet, tandis qu'en Californie d'amples exercices de planification ont été réalisés, qui comprennent l'*Integrated Energy Policy Report* (IEPR) produit semestriellement par la CEC et les mises à jour du PEPICC et du CARB. L'importance accordée à la planification ne doit pas faire croire que ces administrations ont sombré dans une planification centralisée de type soviétique. Elle montre plutôt que planification étatique et politique économique libérale peuvent être conjuguées dans des configurations qui auraient été inimaginables il y a seulement une décennie.

Historiquement, la Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie (TRNEE), organisme consultatif indépendant en matière de politiques créé en 1988, a le mandat de rassembler les Canadiens pour concevoir et mettre en œuvre de nouveaux instruments de durabilité, évaluer les options disponibles et faire des recommandations au Premier ministre et au Cabinet (Page, 2013 : 6). La particularité de la TRNEE était de pouvoir développer sa propre expertise en modélisation, par exemple en examinant la tarification du carbone à l'aide des modèles SCMI, TIM et D-GEEM (TRNEE, 2009). Elle doit également être en mesure d'engager des entreprises pour effectuer du travail de modélisation spécifique, comme elle l'a fait en 2012 lorsqu'elle a demandé à Navius un état des lieux de la politique climatique au Canada (TRNEE, 2012). La TRNEE a néanmoins cessé d'exister en 2013, après que son financement a été supprimé (TRNEE, 2013).

L'analyse insuffisante des liens entre énergie et efforts pancanadiens de réduction des émissions

Une autre caractéristique importante des initiatives actuelles de modélisation des systèmes énergétiques est le peu d'attention qu'elles accordent aux liens entre énergie et efforts de réduction des émissions. Il faut en effet se pencher davantage sur la question de l'intégration des marchés de l'électricité (Pineau, 2013), dès lors que des synergies pourraient être développées entre les provinces disposant de surplus d'énergie propre et leurs voisines, afin d'éviter des émissions de GES (Amor et al., 2011). La modélisation des systèmes énergétiques intégrés orientée sur les implications du négoce des émissions mérite sans aucun doute davantage d'attention. À notre connaissance, seule une poignée d'études s'est penchée sur l'impact économique d'un système de plafonnement et d'échange liant le Québec, l'Ontario et la Californie (CARB, 2012; Sawyer et al., 2016; Équipe de modélisation économique de la WCI, 2012). Alors que de nombreuses études pancanadiennes sur les coûts de l'énergie et de la réduction des émissions sont disponibles pour les provinces et territoires du Canada (par exemple, Rivers, 2010), il n'existe, autant que nous le sachions, aucune étude envisageant la coopération interprovinciale en matière de réduction des émissions sous l'angle d'un système pancanadien d'échange de droits d'émissions ou d'une taxe harmonisée sur le carbone, à l'exception notable de Vaillancourt *et al.* (2017)^{vii}.

^{vii} Cette étude envisage une cible de réduction des GES à l'échelle du Canada. Le coût marginal des réductions compilé par NATEM correspond au montant de la taxe harmonisée sur le carbone dont devraient s'acquitter les 13 provinces et territoires du Canada (considérés séparément par le modèle) afin d'atteindre globalement la cible canadienne.

6/Pour aller plus loin

Notre examen fait clairement ressortir que le Canada possède une expertise de niveau international en matière de modélisation. Néanmoins, deux éléments clés font défaut : (i) un financement permanent et prévisible à long terme pour le développement, la maintenance et le fonctionnement d'une diversité de modèles de systèmes énergétiques; et (ii) un cadre national qui permet aux spécialistes de travailler ensemble, tout en dialoguant avec les décideurs politiques et le grand public, à l'atteinte d'objectifs énergétiques et climatiques, et ce, de façon à ce que le processus décisionnel prenne davantage en compte une vision systémique.

Nous recommandons donc que **le gouvernement fédéral canadien affecte des ressources à la mise en œuvre d'une initiative de modélisation des systèmes énergétiques (IMSE) permanente qui permettrait de :**

- 1. Acquérir ou utiliser des modèles de systèmes énergétiques qui sont disponibles dans l'espace public et gérés de façon à être libre d'accès, en source ouverte et transparents pour les utilisateurs formés au Canada.**

L'IMSE doit s'engager à améliorer la transparence, la confiance, la viabilité et la clarté des politiques. Pour ce faire, les modèles doivent être la propriété du gouvernement et/ou placés entre les mains d'un organisme sans but lucratif ayant un mandat et une gouvernance qui l'engagent à garantir un accès libre et des sources ouvertes. Cela démocratisera la modélisation des systèmes énergétiques et suscitera une plus grande confiance dans les outils utilisés; les capacités de ces derniers s'élargiront et ils généreront des connaissances utiles pour les décideurs.

Nous suggérons que le financement soit au moins suffisant pour créer une initiative permanente destinée à aider le Canada à atteindre ses engagements de réduction d'émissions à l'horizon 2030 et au-delà, conformément à l'Accord de Paris.

Bien que nous ne recommandions pas un modèle de gouvernance spécifique, nous recommandons que cette initiative soit gérée par des ministères ou des organismes qui ont un intérêt particulier à accéder à ces outils de simulation et aux connaissances qu'ils généreront.

- 2. Utiliser des institutions existantes pour créer et pérenniser une infrastructure de connaissances en modélisation des systèmes énergétiques d'une manière qui reflète la diversité régionale du Canada.**

Parce que le caractère fédéral du Canada est particulièrement important pour les politiques énergétiques et climatiques, il est nécessaire de l'intégrer à la conception de toute infrastructure. Les schémas institutionnels qui ont fonctionné dans des États unitaires, comme le Royaume-Uni et la Suède (et, dans une certaine mesure, la Californie), ne peuvent être directement transposés.

Par conséquent, nous suggérons que cette nouvelle infrastructure de connaissances soit constituée, dans des universités du Canada, d'un ensemble de pôles régionaux multidisciplinaires en interaction qui soutiennent le développement et l'exploitation d'activités de modélisation pertinentes pour leur région. Ces pôles serviraient également à former des experts en ce qui concerne (a) le développement de la capacité de nouveaux modèles, (b) la manière d'utiliser les modèles pour répondre aux questions qui sont importantes pour les décideurs et (c) la meilleure façon de communiquer les connaissances aux décideurs et au grand public, lesquels sont une composante essentielle dans tout effort de transformation des systèmes énergétiques.

Ces pôles nécessiteraient la mise sur pied d'équipes de recherche permanentes à même de développer, maintenir et faire fonctionner les modèles et les bases de données, sous la supervision de professeurs.

Ces pôles régionaux seraient également en mesure de travailler en étroite collaboration avec les gouvernements provinciaux, le secteur privé et les Premières Nations, en institutionnalisant des rencontres régulières entre spécialistes en énergie, décideurs et acteurs concernés à tous les niveaux.

Le contexte institutionnel que nous proposons reflète les pratiques exemplaires de modélisation des systèmes énergétiques observées à travers le monde, tout en tenant compte des spécificités de la géographie singulière du Canada et de son système fédéral. Il prend appui sur les universités qui constituent le modèle pour le développement de connaissances au Canada, et son recours à des institutions existantes facilite sa mise en place.

3. Soutenir la coordination des efforts de modélisation, d'analyse et de communication à l'échelle nationale afin d'assurer l'ouverture et l'indépendance ainsi que la collaboration, les comparaisons, les échanges et l'innovation.

La coordination entre les diverses institutions soutenues par cette initiative est essentielle pour assurer que les différents ensembles de codes et de données soient accessibles à tous, qu'ils puissent interagir et se prêter à la comparaison.

La coordination nationale facilitera les échanges et les collaborations entre institutions et chercheurs, ce qui donnera du poids à la contribution du Canada à la modélisation des systèmes énergétiques sur la scène internationale. Le transfert de connaissances à divers gouvernements, agences, secteurs industriels et autres acteurs de la société civile y gagnera également.

En outre, cette coordination nationale favorisera l'identification de lacunes dans les méthodes de modélisation et mettra en évidence les nouveaux besoins en matière de données sur l'énergie.

Annexe

Tableau A1 : Vue d'ensemble des caractéristiques clés des versions de modèles participatifs utilisés dans le cadre de l'EMF 24

Model	Covered sectors	Number of US Regions	Covered Gases	Model Base Year	Model of Technology Choice
ADAGE	Energy, Rest of Economy (Limited Land Use)	6	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC, SF ₆	2010	CESproduction function
CIMS	Energy	1	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	2005	Probabilistic choice model
EC-IAM	Energy, Rest of Economy (no Land Use)	1	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, Short lived F-gases, long lived F-gases	2000	Linear/Non-Linear programming (Electric supply Sector, Non-Electric Energy Supply Sector); CESproduction function (Rest of Economy)
FARM	Energy, Rest of Economy (no Land Use)	1	CO ₂	2004	CESproduction function
GCAM	Energy, Land Use	1	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC, SF ₆	2005	Logit choice model
NewERA	Energy, Rest of Economy (no Land Use)	1*	CO ₂	2008	Linear/Non-Linear programming (Electric Supply Sector); CES Production Function (all Other Sectors)
ReEDS	Electric Supply	134	CO ₂	2010	Linear/Non-Linear programming
USREP	Energy, Rest of Economy (no Land Use)	12	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFC, PFC, SF ₆	2004	CESproduction function
US-REGEN	Energy, Rest of Economy (no Land Use)	15	CO ₂	2010	Linear/Non-Linear programming (Electric supply Sector); CES Production Function (all Other Sectors)

Model	Model Time Step (years)	Last Model Year without Climate Policy	Intertemporal Solution Approach	Bio w/CCS	Citation for Paper in this Volume
ADAGE	5	2010	Intertemporal Optimization	No	Ross et al. (2013)
CIMS	5	2010	Recursive Dynamic	No	Jaccard and Goldberg (2013)
EC-IAM	10	2010	Intertemporal Optimization	No	Zhu and Ghosh (2013)
FARM	5	2009	Recursive Dynamic	Yes	Sands et al. (2013)
GCAM	5 (but 2012 is included as an additional year)	2012	Recursive Dynamic	Yes	Wise et al. (2013)
NewERA	5	2010	Intertemporal Optimization	No	Tuladhar et al. (2013)
ReEDS	2	2012	Sequential Myopic	No	Sullivan et al. (2013)
USREP	5	2010	Recursive Dynamic	No	Rausch et al. (2010)
US-REGEN	5	2010	Intertemporal Optimization	No	Blanford et al. (2013)

Références

- AEA, 2011. Comparative Review of the DECC Energy Model – Report for the Committee on Climate Change, Didcot, United Kingdom.
- Amor, M.B., Pineau, P.-O., Gaudreault, C., Samson, R., 2011. Electricity trade and GHG emissions: Assessment of Quebec's hydropower in the Northeastern American market (2006–2008). *Energy Policy* 39, 1711-1721.
- Aydinalp-Koksal, M., Ugursal, V.I., 2008. Comparison of neural network, conditional demand analysis, and engineering approaches for modelling end-use energy consumption in the residential sector. *Appl. Energy* 85, 271-296.
- Aydinalp, M., Ugursal, V.I., Fung, A.S., 2002. Modelling of the appliance, lighting, and space-cooling energy consumptions in the residential sector using neural networks. *Appl. Energy* 71, 87-110.
- Bahn, O., Haurie, A., Zachary, D.S., 2005. Mathematical Modelling and Simulation Methods in Energy Systems, in: Filar, J.A., Krawczyk, J.B. (Eds.), *Mathematical Models*, Vol. II. EOLSS/UNESCO, Oxford, pp. 241-257.
- BC Ministry of Environment, 2016. Summary of GHG Emissions, 1990 - 2014. British Columbia Environment. Site Internet (consulté le 10 février 2017) disponible à l'adresse suivante : <http://www2.gov.bc.ca/gov/content/environment/climate-change/data/provincial-inventory>, Victoria.
- Berck, P., Braennlund, R., Berck, C.S., 2010. Green regulations in California and Sweden. *Journal of Natural Resources Policy Research* 3, 49-61.
- Berck, P., Xie, L., 2010. A policy model for climate change in California. *Journal of Natural Resources Policy Research* 3, 37-47.
- Bernstein, S., 2002. International institutions and the framing of domestic policies: The Kyoto Protocol and Canada's response to climate change. *Policy Sciences* 35, 203-236.
- Blanchard, P., Rihoux, B., Álamos-Concha, P., 2017. Comprehensively mapping political science methods: an instructors' survey. *International Journal of Social Research Methodology* 20, 209-224.
- Blyth, M., 2009. An Approach to Comparative Analysis or a Subfield within a Subfield? Political Economy, in: Lichbach, M.I., Zuckerman, A.S. (Eds.), *Comparative Politics: Rationality, Culture, and Structure*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 193-219.
- British Columbia, 2008. Climate Action Plan. British Columbia, Victoria. Disponible à l'adresse suivante : www.gov.bc.ca/premier/attachments/climate_action_plan.pdf.
- CAC, 2015. Solutions technologiques et politiques pour un système énergétique à faibles émissions au Canada. Conseil des académies canadiennes, Ottawa.
- CAPP, 2015. Crude Oil: Forecast, Markets & Transportation. Canadian Association of Petroleum Producers, Calgary.
- CAPP, 2017. Statistical Handbook for Canada's Upstream Petroleum Industry. Canadian Association of Petroleum Producers, Calgary.
- CARB, 2008. Climate Change Scoping Plan: a framework for change. California Air Resources Board, Sacramento.
- CARB, 2010. Economic Models. California Air Resources Board. Site Internet (consulté le 3 février 2017) : <https://www.arb.ca.gov/cc/scopingplan/economics-sp/models/models.htm>, Saramento.
- CARB, 2012. Staff Report: Initial Statement of Reasons for Proposed Amendments to the California Cap on Greenhouse Gas Emissions and Market-Based Compliance Mechanisms to Allow for the Use of Compliance Instruments Issued by Linked Jurisdictions. California Air Resources Board, Sacramento.
- CARB, 2017. 2017 Climate Change Scoping Plan Update: The Proposed Strategy for Achieving California's 2030 Greenhouse Gas Target. California Air Resources Board, Sacramento.
- CCC, 2008. Building a low-carbon economy – The UK's contribution to tackling climate change. Committee Climate Change, London.

CCC, 2010a. The Fourth Carbon Budget – Reducing Emissions through the 2020s. Committee Climate Change, London.

CCC, 2010b. Framework Document, United Kingdom.

CCC, 2014. Corporate Plan 2014-2017, United Kingdom.

CCC, 2017. Carbon budgets: how we monitor emissions targets. Committee on Climate Change, London. Site Internet (consulté le 18 février 2017): <https://www.theccc.org.uk/tackling-climate-change/reducing-carbon-emissions/carbon-budgets-and-targets/>.

CdF, 2015. Stratégie canadienne de l'énergie. Conseil de la Fédération, Ottawa.

CEC, 2015. 2015 Integrated Energy Policy Report. California Energy Commission, Sacramento.

CEC, 2017. Energy Assessments Division. California Energy Commission, Sacramento. Site Internet (consulté le 24 février 2017): <http://www.energy.ca.gov/assessments/>.

CERI, 2017. Greenhouse Gas Emissions Reductions in Canada through Electrification of Energy Services. Calgary, Canada Energy Research Institute.

CESAR, 2017a. The CanESS Model. Canadian Energy Systems Analysis Research (CESAR). Site Internet (consulté le 18 février 2017): <http://www.cesarnet.ca/research/caness-model>, Calgary.

CESAR 2017b. The CESAR Pathways Project. Canadian Energy Systems Analysis Research (CESAR). Site Internet (consulté le 4 août 2017): <http://www.cesarnet.ca/cesar-pathways-project>

Chevalier, J.M., Buckles, D., 2013. Participatory action research: Theory and methods for engaged inquiry. Routledge.

Corman, J.N., 2004. Federal Preemption under the Clean Air Act: A Loss for the Environment but Not Necessarily a Victory for Diesel. *Mo. Env'tl. L. & Pol'y Rev.* 12, 199.

DBEIS, 2017. Energy and emissions projections. Department for Business, Energy & Industrial Strategy, London. Site Internet (consulté le 27 mars 2017): <https://www.gov.uk/government/collections/energy-and-emissions-projections>.

DECC, 2009. The UK Low Carbon Transition Plan - National strategy for climate and energy, United Kingdom.

DECC, 2011. The Carbon Plan: delivering our low carbon future, United Kingdom.

DECC, 2014. Foreword by the Departmental Board, in: <https://www.gov.uk/government/publications/department-of-energy-and-climate-change-improvement-plan-2014/department-of-energy-and-climate-change>, D.o.E.a.C.C.W.a.M. (Ed.).

DECC, 2015. UK's Second Biennial Report under the United Nations Framework Convention on Climate Change. Department of Climate Change, London.

Department for Business Energy and Industrial Strategy, 2017. Digest of UK Energy Statistics (DUKES). Department for Business Energy and Industrial Strategy, United Kingdom.

Department of Environment and Energy, 2016. Regleringsbrev för budgetåret 2017 avseende Naturvårdsverket, Stockholm.

DOE, 2017. Annual Report on the State of the DOE National Laboratories. US Department of Energy, Washington, DC.

Doern, G.B., Auld, G., Stoney, C., 2015. Green-lite: Complexity in Fifty Years of Canadian Environmental Policy, Governance, and Democracy. McGill-Queen's Press-MQUP.

E3, 2017. Tools: PATHWAYS Model. E3. Site Internet (consulté le 3 février 2017): <https://www.ethree.com/tools/pathways-model/#>, San Francisco.

ECCC, 2016. Canada's Mid-Century Long-term Low-Greenhouse Gas Development Strategy. Environment and Climate Change Canada, Ottawa.

EIA, 2009. The National Energy systems modelling System: An Overview 2009. Energy Information Administration, Washington, DC. Site Internet (consulté le 18 février 2017): <https://www.eia.gov/outlooks/steo/documentation/overview.pdf>.

- EIA, 2016. International Energy Outlook 2016. US Energy Information Administration, Washington, DC.
- EIA, No Date. Regional Short-Term Energy Model (RSTEM) Overview. Energy Information Administration, Washington, DC. Site Internet (consulté le 18 février 2017): <https://www.eia.gov/outlooks/steo/documentation/overview.pdf>.
- EMF, 2017. About. Energy systems modelling Forum, Stanford. Site Internet (consulté le 18 février 2017): <https://emf.stanford.edu/about>.
- EMMC, 2012. Canada as a Global Energy Leader - Toward Greater pan-Canadian Collaboration: A Progress report, Energy and Mines Ministers' Conference, Charlottetown, PEI, Canada.
- ECCC, 2017a. Inventaire canadien des gaz à effet de serre, disponible à la page suivante : <https://www.ec.gc.ca/ges-ghg/default.asp?lang=Fr&n=83A34A7A-1>, E.a.C.C.W.a.M. (Ed.).
- ECCC, 2017b. Projections des émissions de gaz à effet de serre au Canada. Environnement et Changement climatique Canada. Site Internet (consulté le 17 mars 2017) : <https://www.ec.gc.ca/ges-ghg/default.asp?lang=Fr&n=985F05FB-1>, Canada.
- Environnement Canada, 2014. Tendances en matière d'émissions au Canada. Environnement Canada, Ottawa.
- Erickson, P., Lazarus, M., 2014. Impact of the Keystone XL pipeline on global oil markets and greenhouse gas emissions. *Nature Climate Change* 4, 778-781.
- Farber, D.A., 2008. Climate change, federalism, and the constitution. *Ariz. L. Rev.* 50, 879.
- Fawcett, A.A., Clarke, L.E., Weyant, J.P., 2015. Introduction to EMF 24. VIA ELECTRONIC MAIL, 1.
- Flanagan, E., Demerse, C., 2014. Climate Implications of the Proposed Energy East Pipeline: A Preliminary Assessment. The Pembina Institute, Calgary.
- Flyvbjerg, B., 2013. Quality control and due diligence in project management: Getting decisions right by taking the outside view. *International Journal of Project Management* 31, 760-774.
- Fondation familiale Trottier, T.C.A.o.E., Fondation David Suzuki, 2016. Défis et opportunités pour le Canada : Transformations pour une réduction majeure des émissions de GES, Canada.
- Foxon, T.J., Pearson, P.J.G., 2013. The UK low carbon energy transition: prospects and challenges, Realising Transition Pathways Working Paper 2013/3. Realising Transition Pathways, University of Bath and Cardiff University, Bath & Cardiff.
- Fulton, L., Morrison, G., Parker, N., Witcover, J., Sperling, D., 2014. Three Routes Forward for Biofuels: Incremental, Transitional and
- Gabriel, S.A., Kydes, A.S., Whitman, P., 2001. The National Energy systems modelling System: a large-scale energy-economic equilibrium model. *Operations Research* 49, 14-25.
- Geels, F.W., Berkhout, F., van Vuuren, D.P., 2016. Bridging analytical approaches for low-carbon transitions. *Nature Clim. Change* 6, 576-583.
- Gillenwater, M., 2011. What Is Additionality? Part 1: A Long Standing Problem. GHG Management Institute, Silver Spring, MD.
- Gouvernement du Canada, 2016. Émissions de gaz à effet de serre. Environnement et Changement climatique Canada. Site Internet (consulté le 25 février 2017) : <https://www.ec.gc.ca/indicateurs-indicators/default.asp?lang=Fr&n=FBF8455E-1>, Ottawa.
- Gouvernement du Canada, 2017. Réseaux de centres d'excellence (RCE). Gouvernement du Canada. Site Internet (consulté le 18 mars 2017) : http://www.nce-rce.gc.ca/NetworksCentres-CentresReseaux/ByProgram-ParProgramme_fra.asp.
- Greenblatt, J.B., 2015. Modelling California policy impacts on greenhouse gas emissions. *Energy Policy* 78, 158-172.
- Haagen-Smit, A.J., 1970. A Lesson from the Smog Capital of the World. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 67, 887-897.

Hall, L.M., Buckley, A.R., 2016. A review of energy systems models in the UK: Prevalent usage and categorisation. *Appl. Energy* 169, 607-628.

Hall, P., 2003. Aligning Ontology and Methodology in Comparative Research, in: Mahoney, J., Rueschemeyer, D. (Eds.), *Comparative Historical Analysis in the Social Sciences*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 373-404.

Hall, P.A., 1997. The Role of Interests, Institutions and Ideas in the Comparative Political Economy of the Industrialized Nations, in:

Hall, P.A., 2008. Systematic Process Analysis: when and how to use it. *European Political Science* 7, 304-317.

Hanemann, W.M., 2007. How California Came to Pass AB 32, the Global Warming Solutions Act of 2006. Department of Agricultural & Resource Economics, UCB.

Harrison, K., 2013. Federalism and Climate Policy Innovation: A Critical Reassessment. *Canadian Public Policy* 39, S95-S108.

Houle, D., Lachapelle, E., Purdon, M., 2015. The Comparative Politics of Sub-Federal Cap-and-trade: Implementing the Western Climate Initiative. *Global Environmental Politics* 15, 49-73.

Howells, M., Rogner, H., Strachan, N., Heaps, C., Huntington, H., Kypreos, S., Hughes, A., Silveira, S., DeCarolis, J., Bazillian, M., Roehrl, A., 2011. OSeMOSYS: The Open Source Energy systems modelling System: An introduction to its ethos, structure and development. *Energy Policy* 39, 5850-5870.

Huntington, H.G., Weyant, J.P., Sweeney, J.L., 1982. Modelling for insights, not numbers: the experiences of the energy systems modelling forum. *Omega* 10, 449-462.

IEA, 2009. Sectoral Approaches in Electricity. International Energy Agency (IEA), Paris.

IEA, 2013. Energy Policies of IEA Countries - Sweden, Paris, France.

IEA, 2016. Energy Policies of IEA Countries: Canada. International Energy Agency, Paris.

James, P., Michelin, R., 1989. The Canadian National Energy Program and Its Aftermath: Perspectives on an Era of Confrontation. *American Review of Canadian Studies* 19, 59-81.

Karatasou, S., Santamouris, M., Geros, V., 2006. Modelling and predicting building's energy use with artificial neural networks: Methods and results. *Energy and Buildings* 38, 949-958.

Kialashaki, A., Reisel, J.R., 2013. Modelling of the energy demand of the residential sector in the United States using regression models and artificial neural networks. *Appl. Energy* 108, 271-280.

Kiesling, E., Günther, M., Stummer, C., Wakolbinger, L.M., 2012. Agent-based simulation of innovation diffusion: a review. *Central European Journal of Operations Research* 20, 183-230.

Krupa, J., 2012. Identifying barriers to aboriginal renewable energy deployment in Canada. *Energy Policy* 42, 710-714.

Krupa, J., Galbraith, L., Burch, S., 2015. Participatory and multi-level governance: applications to Aboriginal renewable energy projects. *Local Environment* 20, 81-101.

Kypreos, S., Bahn, O. (2003). "A MERGE model with endogenous technological progress", *Environmental Modeling and Assessment*, Vol. 8, pp. 249-259.

Leach, A., 2014. Why the debate over Keystone and emissions comes down to rail, *Maclean's*, 12 August 2014, Site Internet (consulté le 2 février 2015): <http://www.macleans.ca/economy/economicanalysis/kxl-econ-101-lecture-2/>.

Leapfrog. Institute of Transportation Studies, UC Davis, Davis, California.

Levasseur, A., Bahn, O., Beloin Saint-Pierre, D., Marinova, M., Vaillancourt, K. (2017). "Assessing butanol from integrated forest biorefinery: A combined techno-economic and life cycle approach", *Applied Energy*, Vol. 198, pp. 440-452.

Lichbach, M.I., Zuckerman, A.S. (Eds.), *Comparative Politics: Rationality, Culture and Structure*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 174-207.

- Lichtman, A.J., 2016. Predicting the Next President: The Keys to the White House 2016. Rowman & Littlefield, Lanham, Maryland.
- Lockwood, M., 2013. The political sustainability of climate policy: The case of the UK Climate Change Act. *Global Environmental Change* 23, 1339-1348.
- Lohmann, L., 2005. Marketing and Making Carbon Dumps: commodification, calculation and counterfactuals in climate change mitigation. *Science as Culture* 14, 203-235.
- Loulou, Berger, Dubois, Haurie, Lessard, Waub. (1992). "Canadian MARKAL: an advanced linear programming system for energy and environment modelling", *INFOR*, Vol. 20, pp. 114-125.
- Lovallo, D., Kahneman, D., 2003. Delusions of success. *Harvard business review* 81, 56-63.
- Løken, E., 2007. Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 1584-1595.
- Mahoney, J., 2008. Toward a unified theory of causality. *Comparative Political Studies*.
- Mahoney, J., 2010. After KKV: The new methodology of qualitative research. *World Politics* 62, 120-147.
- Manne, A.S. and Richels, R.G. MERGE: An integrated assessment model for global climate change. In Loulou, R., Waub, J.-P., and Zaccour, G., editors, *Energy and Environment. GERAD 25th Anniversary Series*, pages 175-189. Springer, 2005.
- Manyika, J., Chui, M., Brown, B., Bughin, J., Dobbs, R., Roxburgh, C., Byers, A.H., 2011. Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity.
- Mathew, P.A., Dunn, L.N., Sohn, M.D., Mercado, A., Custudio, C., Walter, T., 2015. Big-data for building energy performance: Lessons from assembling a very large national database of building energy use. *Appl. Energy* 140, 85-93.
- Mazmanian, D.A., Jurewitz, J., Nelson, H., 2008. California's Climate Change Policy: The Case of a Subnational State Actor Tackling a Global Challenge. *The Journal of Environment & Development* 17, 401-423.
- Mazmanian, D.A., Nelson, H.T., Jurewitz, J., 2013. Climate Change Policy: A Race to the Top, in: Rarick, E. (Ed.), *Governing California: Politics, Government and Public Policy in the Golden State*, 3rd Edition. Berkeley Public Policy Press, University of California, Berkeley, pp. 405-428.
- Mendelson, N.A., 2008. The California Greenhouse Gas Waiver Decision and Agency Interpretation: A Response to Professors Galle and Seidenfeld. *Duke Law Journal* 57, 2157-2175.
- Miljömålsberedningen, 2016a. En klimat- och luftvårdsstrategi för Sverige - Del 1. Delbetänkande av Miljömålsberedningen, Stockholm, Sweden.
- Miljömålsberedningen, 2016b. En klimat- och luftvårdsstrategi för Sverige - Del 2. Bilaga med underlagsrapporter. Delbetänkande av Miljömålsberedningen, Stockholm.
- Miljömålsberedningen, 2016c. En klimat- och luftvårdsstrategi för Sverige - Del 2. Bilaga med underlagsrapporter. Delbetänkande av Miljömålsberedningen, Stockholm.
- Ministry of the Environment and Energy, 2014. Regleringsbrev för budgetåret 2015 avseende Naturvårdsverket. Swedish Environmental Protection Agency. Site Internet (consulté le 18 février 2017): <http://www.esv.se/statsliggaren/regleringsbrev/?RBID=16253>, Stockholm.
- Moore, T.Y., Ruel, J.-C., Lapointe, M.-A., Lussier, J.-M., 2012. Evaluating the profitability of selection cuts in irregular boreal forests: an approach based on Monte Carlo simulations. *Forestry* 85, 63-77.
- Morton, F.L., 1996. The Constitutional Division of Powers with Respect to the Environment in Canada, in: Holland, K.M., Morton, F.L., Galligan, B. (Eds.), *Federalism and the environment: environmental policymaking in Australia, Canada, and the United States*. Greenwood Publishing Group, pp. 37-64.
- Murat, Y.S., Ceylan, H., 2006. Use of artificial neural networks for transport energy demand modelling. *Energy policy* 34, 3165-3172.
- Murray, B., Rivers, N., 2015. British Columbia's revenue-neutral carbon tax: A review of the latest "grand experiment" in environmental policy. *Energy Policy* 86, 674-683.

National Institute of Economic Research, 2017. General Equilibrium Modelling – EMEC. National Institute of Economic Research. Site Internet (consulté le 17 mars 2017): <http://konj.se/english/about-nier/environmental-economics/general-equilibrium-modelling---emec.html>, Stockholm, Sweden.

ONE, 2016a. Avenir énergétique du Canada en 2016.

ONE, 2016b. Avenir énergétique du Canada en 2016 - Mise à jour. Office national de l'énergie, Calgary.

ONE, 2017. Statistiques et analyses, disponibles à l'adresse : <https://www.neb-one.gc.ca/nrg/sttstc/index-fra.html>, N.E.B.W.a.M. (Ed.).

Östblom, G., 1999. An Environmental Medium Term Economic Model, EMEC Working Paper 69. National Institute of Economic Research, Stockholm.

Page, B., 2013. The Legacy of Canada's National Round Table on the Environment and the Economy. Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, Ottawa.

Peters, J., Wolinetz, M., Rivers, N., 2015. Discussion Paper: Greenhouse Gas Emissions Resulting from the Energy East Pipeline Project. Navius Research, Vancouver.

Pfenninger, S., Hawkes, A., Keirstead, J., 2014. Energy systems modelling for twenty-first century energy challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 33, 74-86.

Pineau, P.-O., 2013. Fragmented markets: Canadian electricity sectors' underperformance. Evolution of global electricity markets: new paradigms, new challenges, new approaches, 363-392.

Pohekar, S., Ramachandran, M., 2004. Application of multi-criteria decision-making to sustainable energy planning—a review. *Renewable and sustainable energy reviews* 8, 365-381.

Profu, 2012. Beräkningar med MARKAL-NORDIC inför Färdplan 2050, Göteborg, Sweden.

Purdon, M., 2009. Bio-carbon Overview, in: Kelly, R., Purdon, M. (Eds.), *Bio-Carbon in Eastern & Southern Africa: harnessing carbon finance to promote sustainable forestry, agro-forestry and bio-energy*. UNDP, New York, pp. 2-25.

Purdon, M., 2015a. Advancing Comparative Climate Change Politics: Theory & Method. *Global Environmental Politics* 15, 1-26.

Purdon, M., 2015b. Opening the Black Box of Carbon Finance "Additionalty": the Political Economy of Carbon Finance Effectiveness across Tanzania, Uganda and Moldova. *World Development* 74, 462–478.

Purdon, M., Breton, S.-P., 2016. Émissions en aval résultant de l'oléoduc Énergie Est : une évaluation considérant les risques économiques, techniques et politiques (Document de travail no 2 de l'IQCarbone). Institut québécois du carbone, Montréal.

QER, 2015. Quadrennial Energy Review: ENERGY TRANSMISSION, STORAGE, AND DISTRIBUTION INFRASTRUCTURE. Department of Energy, Washington, DC.

QER, 2017. Quadrennial Energy Review: TRANSFORMING THE NATION'S ELECTRICITY SYSTEM. Department of Energy, Washington, DC.

Radin, B.A., Boase, J.P., 2000. Federalism, political structure, and public policy in the United States and Canada. *Journal of Comparative Policy Analysis: Research and Practice* 2, 65-89.

Rai, V., Henry, A.D., 2016. Agent-based modelling of consumer energy choices. *Nature Clim. Change* 6, 556-562.

Riekkola, A.K., 2015. National Energy System Modelling for Supporting Energy and Climate Policy Decision-making: The Case of Sweden. Chalmers University of Technology, Sweden.

Righetti, T., Godby, R.W., Echeverri, D.P., Stoellinger, T.L., Coddington, K.A., 2016. The Role of Energy Models: Characterizing the Uncertainty of the Future Electricity System to Design More Efficient and Effective Laws and Regulations. *George Washington Journal of Energy & Environmental Law* 8, 56-77.

Rivers, N., 2010. Current Federal and Provincial Approaches to Climate Change Mitigation: Are We Repeating Past Mistakes?, in: Courchene, T.J., Allen, J.R. (Eds.), *Carbon Pricing and Environmental Federalism*. Queen's Institute of Intergovernmental Affairs, Kingston, pp. 45-60.

Rivers, N., Jaccard, M., 2005. Combining top-down and bottom-up approaches to energy-economy modelling using discrete choice methods. *The Energy Journal*, 83-106.

- RNCAN, 2006. Perspectives énergétiques du Canada : scénario de référence de 2006. Ressources naturelles Canada, Ottawa, Canada.
- RNCAN, 2017. Base de données complète sur la consommation d'énergie, disponible à l'adresse : https://oee.nrcan.gc.ca/organisme/statistiques/bnce/apd/menus/evolution/tableaux_complets/liste.cfm, N.R.C.W.a.M. (Ed.).
- Rojas, R., 2013. Neural networks: a systematic introduction. Springer Science & Business Media.
- Sawyer, D., Bataille, C., 2016. Still Minding the Gap: An Assessment of Canada's Greenhouse Gas Reduction Obligations. Deep Decarbonization Pathways Project Team, Paris.
- Sawyer, D., Peters, J., Stiebert, S., 2016. Impact of Modelling and Analysis of Ontario's Proposed Cap and Trade Program. EnviroEconomics, Navius Research and Dillon Consulting, Ottawa.
- Scott, J.C., 1998. Seeing Like a State: how certain schemes to improve the human condition have failed. Yale University Press, New Haven; London.
- SEPA, 2012. Underlag till en färdplan för ett Sverige utan klimatutsläpp 2050, Stockholm, Sweden.
- SEPA, 2015a. Report for Sweden on assessment of projected progress. Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm.
- SEPA, 2015b. Utveckling av arbetet med modellering, scenarier och styrmedelsutvärdering i klimat- och energipolitiken. NV-00322-15. Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm.
- SEPA, 2017. About the Swedish Environmental Protection Agency. Swedish Environmental Protection Agency. Site Internet (consulté le 18 février 2017) : <http://www.swedishepa.se/About-us/>, Stockholm.
- Siders, D., 2016. Jerry Brown signs major climate bill: 'This is big, and I hope it sends a message across the country', The Sacramento Bee, site Internet (consulté le 3 octobre 2016): <http://www.sacbee.com/news/politics-government/capitol-alert/article100651307.html>, Saramento.
- Simmhan, Y., Aman, S., Kumbhare, A., Liu, R., Stevens, S., Zhou, Q., Prasanna, V., 2013. Cloud-based software platform for big data analytics in smart grids. Computing in Science & Engineering 15, 38-47.
- Smil, V., 2005. Energy at the crossroads: global perspectives and uncertainties. MIT press.
- SSI, No Date. Energy 2020 Document: Volume 1, Overview. Systematic Solutions, Inc., Fairborn, OH.
- SSI & ICF, 2010. Modelling of Greenhouse Gas Reduction Measures to Support the Implementation of the California Global Warming Solutions Act (AB32): ENERGY 2020 Model Inputs and Assumptions. Systematic Solutions, Inc. & iCF Consulting Canada, Inc, Fairborn, OH & Toronto.
- Statistique Canada, 2017. Avis de confidentialité. Statistique Canada, Ottawa. Site Internet (consulté le 20 février 2017) : <http://www.statcan.gc.ca/fra/reference/privée>.
- Swedish Energy Agency, 2014a. Bilaga 1. Urval ur kommande Energiforskningsläget. Appendix to the document "Helhetssyn är nyckeln", Strategi för forskning och innovation på energiområdet 2017-2020. Swedish Energy Agency, Stockholm.
- Swedish Energy Agency, 2014b. Scenarier över Sveriges energisystem – 2014 års långsiktiga scenarier, ett underlag till klimatrapportering. Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm.
- Swedish Energy Agency, 2017a. About Us. Swedish Energy Agency. Site Internet (consulté le 18 février 2017): <http://www.energimyndigheten.se/en/about-us/>, Stockholm.
- Swedish Energy Agency, 2017b. Statistik. Swedish Energy Agency. Site Internet (consulté le 18 février 2017): <http://www.energimyndigheten.se/statistik>, Stockholm.
- Swedish Government, 2016a. Broad consensus in Riksdag on proposal for Sweden's future. Swedish Government. Site Internet (consulté le 27 mars 2017): <http://www.government.se/press-releases/2016/06/broad-consensus-in-riksdag-on-proposal-for-swedens-future/>, Stockholm, Sweden.
- Swedish Government, 2016b. En klimat- och luftvårdsstrategi för Sverige. Swedish Government. Site Internet (consulté le 27 mars 2017): <http://www.regeringen.se/rattsdokument/statens-offentliga-utredningar/2016/06/en-klimat-och-luftvardsstrategi-for-sverige>, Stockholm, Sweden.

Söderholm, P., 2012. Modelling the Economic Costs of Climate Policy: An Overview. *American Journal of Climate Change* 1, 14-32.

TRNEE, 2009. Objectif 2050 : Politique de prix pour le carbone pour le Canada. Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, Ottawa.

TRNEE, 2012. État de la situation : la lutte contre le changement climatique au Canada. Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, Ottawa.

TRNEE, 2013. Message de la TRN. Bibliothèque et Archives Canada, Ottawa. Site Internet (consulté le 17 février 2017) : <http://collectionscanada.gc.ca/webarchives2/20130322140301/http://nrtee-trnee.ca/?lang=fr>.

Turnheim, B., Berkhout, F., Geels, F., Hof, A., McMeekin, A., Nykvist, B., van Vuuren, D., 2015. Evaluating sustainability transitions pathways: Bridging analytical approaches to address governance challenges. *Global Environmental Change* 35, 239-253.

UK-DECC, 2013a. 2050 Energy Calculator. UK Department of Energy & Climate Change, London. Site Internet (consulté le 18 février 2017): <http://2050-calculator-tool.decc.gov.uk/#/calculator>.

UK-DECC, 2013b. Guidance: 2050 Pathways. UK Department of Energy & Climate Change, London. Site Internet (consulté le 18 février 2017): <https://www.gov.uk/guidance/2050-pathways-analysis#the-analysis>.

UK Government, 2013. Energy Act 2013 Chapter 32, United Kingdom.

UK Parliament, 2008. Climate Change Act. UK Parliament. Site Internet (consulté le 18 février 2017): <http://www.legislation.gov.uk/ukpga/2008/27/contents>, London.

Vaillancourt, K., 2010. Modèles énergie-économie-environnement, in: Institut de l'énergie et de l'environnement de la francophonie (Ed.), *Avancées technologies et perspectives - Fiche no 2*, Montréal.

Vaillancourt, K., Alcocer, Y., Bahn, O., Fertel, C., Frenette, E., Garboui, H., Kanudia, A., Labriet, M., Loulou, R., Marcy, M., 2014. A Canadian 2050 energy outlook: Analysis with the multi-regional model TIMES-Canada. *Appl. Energy* 132, 56-65.

Vaillancourt, K., Bahn, O., Frenette, E., Sigvaldason, O. (2017). "Exploring deep decarbonization pathways to 2050 for Canada using an optimization energy model framework", *Applied Energy*, Vol. 195, pp. 774-785.

Wara, M., 2008. Measuring the Clean Development Mechanism's Performance and Potential. *UCLA Law Review* 55, 1759-1803.

Wara, M., Victor, D., 2008. A Realistic Policy on International Carbon Offsets, PSED Working Paper #74. Program on Energy and Sustainable Development, Stanford University, Stanford.

WCI Economic Modelling Team, 2012. Discussion Draft Economic Analysis Supporting the Cap-and-Trade Program - California and Québec. Western Climate Initiative, Sacramento.

Williams, J.H., DeBenedictis, A., Ghanadan, R., Mahone, A., Moore, J., Morrow, W.R., Price, S., Torn, M.S., 2012a. Supporting Materials for Williams et al., "The Technology Path to Deep Greenhouse Gas Emissions Cuts by 2050". *Science* <http://science.sciencemag.org/content/sci/suppl/2011/11/23/science.1208365.DC1/Williams.SOM.pdf>.

Williams, J.H., DeBenedictis, A., Ghanadan, R., Mahone, A., Moore, J., Morrow, W.R., Price, S., Torn, M.S., 2012b. The Technology Path to Deep Greenhouse Gas Emissions Cuts by 2050: The Pivotal Role of Electricity. *Science* 335, 53-59.

Vogel, D., 1995. *Trading Up: Consumer and Environmental Regulation in a Global Economy*. Harvard University Press, Cambridge, MA.

Weijermars, R., Taylor, P., Bahn, O., Das, S.R., Wei, Y.-M. (2012). "Review of models and actors in energy mix optimization □ can leader visions and decisions align with optimum model strategies for our future energy systems?", *Energy Strategy Reviews* Vol. 1, pp. 5-18.

Wolinetz, M., 2016. Modelling the Impact of the Climate Leadership Plan & Federal Carbon Price on British Columbia's Greenhouse Gas Emissions. Navius Research, Vancouver.

Wood, G., Amlin, J., 2008. Energy 2020, AB32 Economic Analysis Technical Stakeholder Group. Site Internet (consulté le 3 février 2017): https://www.arb.ca.gov/cc/scopingplan/economics-sp/meetings/012808/arb_ea_st_mtg_icf_ssi_012808.pdf, Saramento.

Yang, C., Yeh, S., Ramea, K., Zakerinia, S., McCollum, D.L., Bunch, D.S., Ogden, J.M., 2014. Modelling Optimal Transition Pathways to a Low Carbon Economy in California: California TIMES (CA-TIMES) Model, UCD-ITS-RR-14-04. Institute of Transportation Studies, University of California, Davis, Research Report, Davis, CA.

Yang, C., Yeh, S., Zakerinia, S., Ramea, K., McCollum, D., 2015. Achieving California's 80% greenhouse gas reduction target in 2050: Technology, policy and scenario analysis using CA-TIMES energy economic systems model. *Energy Policy* 77, 118-130.

Zhang, J.J., Wang, C., 2011. Co-benefits and additionality of the clean development mechanism: An empirical analysis. *Journal of Environmental Economics and Management* 62, 140-154.

ISBN/

978-2-924597-09-5 (version imprimée)

978-2-924597-10-1 (version PDF)

Traduction et révision/Traducteurs Associés, traducteurs@videotron.ca, 514 523-2989

Design graphique/Alain Roy, ATTENTION design+, attention-design.com

