

CHAPITRE 3 : RESSOURCES NATURELLES

Principaux auteurs :

Donald S. Lemmen (*Ressources naturelles Canada*), **Mark Johnston** (*Saskatchewan Research Council*), **Catherine Ste-Marie** (*Ressources naturelles Canada*) et **Tristan Pearce** (*Université de Guelph*)

Collaborateurs :

Marie-Amélie Boucher (*Université du Québec à Chicoutimi*),
Frank Duerden (*Université de Victoria*), **Jimena Eyzaguirre**
(*ESSA Technologies*), **James Ford** (*Université McGill*), **Robert Leconte** (*Université de Sherbrooke*), **Elizabeth A. Nelson** (*Ressources naturelles Canada*), **Jeremy Pittman**
(*chercheur indépendant*), **Élizabeth Walsh** (*Ressources naturelles Canada*)

Citation recommandée :

Lemmen, D.S., M. Johnston, C. Ste-Marie et T. Pearce. « Ressources naturelles », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, F.J. Warren et D.S. Lemmen (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2014, pp. 65-98.

TABLE DES MATIÈRES

Principales conclusions	67
1. Introduction	68
2. Évaluations précédentes	68
3. Foresterie	70
3.1 Répercussions observées et prévues	71
3.2 Adaptation.....	74
4. Exploitation minière.....	76
4.1 Effets des changements climatiques et options d'adaptation.....	78
4.2 État de l'adaptation au niveau de l'industrie minière canadienne.....	81
5. Énergie.....	81
5.1 Demande d'énergie.....	82
5.2 Sources d'énergie	84
5.3 Transport de l'énergie	92
6. Synthèse.....	92
Références	94

PRINCIPALES CONCLUSIONS

Les ressources naturelles sont un élément indispensable au bien-être des familles canadiennes et à l'économie nationale et régionale et continueront de lui être nécessaires à l'avenir. Même si les effets biophysiques des changements climatiques qui présentent un intérêt pour la plupart des secteurs des ressources naturelles sont bien compris, l'intégration de ces derniers à la planification des programmes d'activités fait généralement défaut. Voici la liste des principales conclusions qui découlent de la documentation récente publiée dans le domaine de la foresterie, de l'exploitation minière et de l'énergie – les secteurs étudiés dans le présent chapitre :

- Les changements climatiques aggraveront les risques climatiques actuels liés à la planification et à la gestion des industries du secteur des ressources naturelles, y compris les activités associées à l'exploration, à la mise en valeur, à l'exploitation, à la distribution, à la fermeture, à la restauration et à la remise en état. Ces risques sont liés aux répercussions et aux catastrophes naturelles associées aux conditions météorologiques extrêmes (p. ex., chaleur, froid, précipitations) et aux événements à évolution lente comme la dégradation du pergélisol, l'élévation du niveau de la mer et la migration des espèces végétales. Les changements climatiques offriront également de nouvelles occasions aux secteurs des ressources naturelles, particulièrement en ce qui a trait au développement économique du Nord.
- Afin de mieux comprendre comment fonctionne l'adaptation au niveau des secteurs des ressources naturelles, il est essentiel de tenir compte des multiples facteurs de stress. Les changements climatiques en tant que tels sont rarement élevés au rang des priorités, puisque les entreprises mettent l'accent sur d'autres facteurs de stress immédiats tels les moteurs économiques. Il existe cependant des occasions d'intégrer les considérations de l'effet des changements climatiques aux processus de planification actuels.
- L'évaluation environnementale, la divulgation des risques et les rapports concernant l'aménagement forestier durable comptent parmi les exemples de processus qui peuvent contribuer à promouvoir les mesures d'adaptation à l'avenir. Ces processus permettent aux gouvernements, aux investisseurs et au public d'évaluer le niveau de compréhension des industries en ce qui a trait aux risques associés aux changements climatiques et d'exercer une influence sur les mesures prises pour les atténuer.
- Bien que la sensibilisation au niveau des répercussions des changements climatiques et la mise en œuvre de mesures d'adaptation ne fassent aucun doute dans les secteurs où l'on observe un lien direct entre le climat et l'approvisionnement en ressources, notamment dans le domaine de la foresterie et de l'hydroélectricité, l'application de méthodes de gestion adaptative visant à atténuer ces répercussions est également observée à l'échelle des secteurs des ressources naturelles. Les méthodes de gestion adaptative comportent des études continues et des activités de surveillance et d'évaluation, entreprises dans le but d'appuyer les éventuelles procédures, politiques et pratiques de gestion, dont la souplesse permettra de faire face aux incertitudes inhérentes aux changements climatiques.

1. INTRODUCTION

Le Canada possède d'importantes ressources naturelles qui font partie intégrante de l'histoire et de l'identité du pays et qui constituent un élément important de l'économie nationale, provinciale et territoriale. Le présent chapitre traite des secteurs des ressources naturelles – foresterie, exploitation minière et énergie – qui, mis ensemble, comptent pour 13,3 % du produit intérieur brut canadien et procurent environ 950 000 emplois (tableau 1; Ressources naturelles Canada, 2013a).

	Foresterie	Exploitation minière	Énergie	Total
PIB (2012)	1,1 %	3,5 %	9,1 %	13,3 %
Emploi direct	224 410	401 315	335 580	948 735
Exportations de produits nationaux (en milliards de \$)	25	90	119	224

TABLEAU 1 : Contribution des secteurs des ressources naturelles à l'économie du Canada en 2011 (extrait modifié tiré de *Ressources naturelles Canada, 2013a*).

L'importance des ressources naturelles du point de vue économique est amplifiée à l'échelle locale. Bien que les collectivités dépendantes des ressources soient surtout petites et situées en région éloignée, la liste comprend également des grandes villes et des villes de taille moyenne, comme Calgary, en Alberta, Hamilton et Sudbury, en Ontario, de même que Prince George et Kamloops, en Colombie-Britannique. Certaines collectivités dépendent uniquement de ces ressources et tirent 80 % ou plus de leurs revenus d'emploi des activités d'exploitation des ressources naturelles (Ressources naturelles Canada, 2009).

La sensibilité au climat de l'exploitation des ressources naturelles dépend du secteur considéré. Les répercussions des changements climatiques sur le rendement économique et la productivité se font davantage sentir dans l'industrie forestière et hydroélectrique. Tous les secteurs des ressources naturelles sont confrontés aux risques climatiques, dont plusieurs sont liés aux phénomènes

météorologiques extrêmes et aux catastrophes naturelles connexes qui surviennent pendant les activités d'exploration, d'exploitation, de transformation, de transport, de remise en état et de déclassement (p. ex., Lemmen *et al.*, 2008a). Les investissements des secteurs des ressources naturelles au cours des dix prochaines années fourniront l'occasion d'intégrer les considérations relatives au changement climatique en vue de renforcer la résilience face aux changements climatiques des activités futures. La mise en chantier de plus de 600 projets d'envergure en matière de ressources est prévue au Canada au cours des dix prochaines années, ce qui représente environ 650 milliards de dollars en investissements (Ressources naturelles Canada, 2012a).

Le présent chapitre donne une vue d'ensemble des progrès accomplis en ce qui a trait au niveau de compréhension actuel des effets des changements climatiques sur les secteurs de la foresterie, de l'exploitation minière et de l'énergie au Canada, et de la progression des secteurs quant à la façon de s'adapter à ces effets. Ce survol s'inspire majoritairement de ce qui a été publié depuis la parution du rapport intitulé *Vivre avec les changements climatiques au Canada* (Lemmen *et al.*, 2008a). Après un bref examen des principales conclusions tirées des évaluations précédentes, le présent chapitre est consacré à trois sections distinctes portant respectivement sur la foresterie, l'exploitation minière et l'énergie. Une étude récente renforce la confiance à l'égard des constatations précédentes et donne de nouvelles perspectives. On accorde une attention toute particulière aux avancées dans le domaine de l'adaptation, que révèlent les nombreux niveaux d'engagement perçus à l'échelle des secteurs (comme le fait de passer de l'étape de la sensibilisation à l'étape de la mise en œuvre des politiques et des changements opérationnels). Le chapitre se termine par une synthèse des conclusions touchant les secteurs de la foresterie, de l'exploitation minière et de l'énergie dans le but de présenter un point de vue global des ressources naturelles en tant que secteur économique, de même que les conséquences des répercussions des changements climatiques et de l'adaptation sur la concurrence économique à court et à long terme. Les autres aspects des ressources naturelles sont abordés aux chapitres 4 – *Production alimentaire*, 5 – *Industrie* et 6 – *Biodiversité et aires protégées*, du présent rapport.

2. ÉVALUATIONS PRÉCÉDENTES

Les ressources naturelles occupent une place prépondérante dans les chapitres traitant de chaque région dans le rapport *Vivre avec les changements climatiques au Canada* (Lemmen *et al.*, 2008a) et dans le chapitre 9 (*Le Canada dans le contexte international*) du même rapport (tableau 2). La vulnérabilité des collectivités dépendantes des ressources est une conclusion d'envergure nationale qui ressort de ce rapport. Elle constitue un indice de la forte sensibilité au climat de nombreuses industries axées sur les ressources naturelles, de la diversification limitée de l'économie et, dans bien des cas, d'un accès restreint aux services (Lemmen *et al.*, 2008b). Cette vulnérabilité est amplifiée dans l'Arctique, où la portée des changements climatiques a non seulement été la plus considérable, mais devrait le demeurer, et en raison de l'éloignement des collectivités et de nombreuses activités liées à l'exploitation des ressources naturelles.

Le quatrième rapport d'évaluation du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) aborde les questions relatives aux secteurs de la foresterie et de l'énergie dans des chapitres thématiques (Easterling *et al.*, 2007; Fischlin *et al.*, 2007; Wilbanks *et al.*, 2007), dans le chapitre sur l'Amérique du Nord (Field *et al.*, 2007) et dans le chapitre qui étudie les liens entre l'adaptation aux changements climatiques et l'atténuation (Klein *et al.*, 2007). Bien qu'il n'existe aucune analyse intégrée de la vulnérabilité des secteurs des ressources naturelles, le rapport met en évidence l'importance de comprendre l'effet des nombreux facteurs de stress sur les industries de ce secteur (Easterling *et al.*, 2007).

	Nord	Canada atlantique	Québec	Ontario	Prairies	Colombie-Britannique	International
Foresterie	X	X	X	X	X	X	X
Exploitation minière	X		X	X	X		X
Demande d'énergie		X	X	X	X	X	X
Approvisionnement en énergie	X	X	X	X	X	X	X

TABEAU 2 : Contenu axé sur les ressources naturelles dans certains chapitres du rapport *Vivre avec les changements climatiques au Canada* (Lemmen *et al.*, 2008a).

FORESTERIE

En raison de leur emplacement septentrional, les forêts canadiennes sont exposées à une plus forte hausse des températures que la moyenne globale (GIEC, 2007), dont les effets considérables varient d'une région à l'autre. Les principales conclusions des évaluations antérieures (Lemmen *et al.*, 2008a; Lemprière *et al.*, 2008, Johnston *et al.*, 2009; Williamson *et al.*, 2009) révèlent ce qui suit :

- L'intensification des régimes de perturbation (p. ex., incendies de forêt, infestation d'insectes et éclosion de maladies) est déjà manifeste et deviendra plus marquée à l'avenir.
- La composition des forêts sera altérée en raison des changements apportés aux régimes climatique et de perturbation.
- Les chemins d'accès forestiers seront touchés par les changements apportés aux régimes de perturbation, l'évolution des coûts d'infrastructure et le raccourcissement de la saison de récolte hivernale, en raison des périodes de gel réduites.
- Les effets nets des changements climatiques sur la productivité forestière seront propres à la collectivité locale et à la région. Des températures plus élevées, des saisons de croissance plus longues et de plus fortes concentrations de dioxyde de carbone (CO₂) pourraient avoir une incidence positive sur la productivité, alors que d'autres facteurs tels le sol, l'eau et les nutriments, ne seront pas limitatifs, mais subiront les effets négatifs associés à l'intensification de la sécheresse et aux perturbations et phénomènes météorologiques extrêmes plus fréquents et plus graves.
- Les répercussions sociales et économiques sur les collectivités forestières (p. ex., coûts relatifs à la sûreté et à la sécurité, emplois dans le secteur forestier et tourisme) seront considérables dans certaines régions.

EXPLOITATION MINIÈRE

Lemmen *et al.* (2008a) consacrent moins de place à l'exploitation minière qu'aux autres secteurs des ressources naturelles, en raison de la pénurie de documents portant sur le sujet disponibles à ce moment. Malgré tout, le rapport énumère les défis que posent le choix des sites, la conception des mines, l'exploitation, les activités et le transport, de même que la fermeture définitive et la restauration des sites dans le contexte des changements climatiques. Les principales constatations font état de ce qui suit :

- Les phénomènes météorologiques extrêmes ont déjà eu des effets négatifs sur certaines activités minières.
- Des vulnérabilités significatives aux changements climatiques ont été observées dans les mines post-opérationnelles et ont une incidence sur l'environnement et les collectivités environnantes.
- Des réductions de la couverture de glace de mer dans l'Arctique pourraient mener à de nouveaux débouchés dans le domaine de l'exploration et de l'exploitation minière dans le Nord, liés en partie à une diminution des coûts d'expédition. Des défis sont également associés aux activités effectuées dans un milieu arctique, y compris les enjeux liés aux mesures de protection de l'environnement et à l'inclusion sociale.
- La diminution de la viabilité des routes d'hiver pourrait avoir une incidence sur l'accès à de nombreux sites miniers exploités en milieu nordique et nécessiter l'établissement d'itinéraires de transport de rechange.
- Des modifications apportées à la conception des mines et des changements opérationnels s'imposeront en vue de gérer les risques de contamination environnementale liée à la dégradation du pergélisol dans le Nord et aux effets des phénomènes météorologiques extrêmes ailleurs dans le monde.
- De nombreux projets récents de développement minier dans le nord du Canada ont tenu compte des effets des changements climatiques prévus dans leurs plans de conception.

ÉNERGIE

L'adaptation de la demande et de l'offre en matière d'énergie aux changements climatiques pose un défi aux industries du secteur énergétique au Canada. Les vulnérabilités particulières varient en fonction de l'emplacement géographique, des sources d'énergie principales et des changements climatiques prévus. Les principales conclusions du rapport de Lemmen *et al.* (2008a) illustrent ce qui suit :

- La demande saisonnière en énergie sera caractérisée par des changements, à savoir une baisse de la demande en chauffage hivernal et une hausse de la demande en climatisation estivale.
- Des écarts entre l'offre et la demande pourraient se manifester, étant donné que la demande de pointe pour la climatisation pourrait coïncider avec la diminution du potentiel hydroélectrique dans certaines régions.

- La production d'hydroélectricité pourrait être touchée par la réduction saisonnière de l'approvisionnement en eau, particulièrement dans les systèmes alimentés par les glaciers. L'intégration des changements apportés aux régimes d'écoulement et aux débits de pointe exigeront sans doute des ajustements au niveau des pratiques en gestion de réservoir.
- Le transport d'électricité est sensible à l'augmentation de la température (plus grande perte énergétique) et aux phénomènes

météorologiques extrêmes (dommages à l'infrastructure entraînant des pannes dans le réseau de distribution).

- La dégradation du pergélisol et l'instabilité du terrain qui en découlera poseront un risque au niveau des infrastructures énergétiques (fondations, oléoducs et routes) dans le nord du Canada.

3. FORESTERIE

La forêt occupe une place importante au Canada et couvre plus de 50 % de la surface totale du pays (figure 1; Ressources naturelles Canada, 2011a). Les changements qui surviennent sur les terres forestières du pays sont principalement causés par des régimes de perturbation à grande échelle. Chaque année, les incendies de forêt et les infestations de ravageurs forestiers touchent 5 % du territoire forestier (Ressources naturelles Canada, 2011a). Le climat est un élément déterminant dans la répartition, la composition, la productivité et la dynamique des forêts, de même que dans les régimes de perturbation. À ce titre, on prévoit que les changements climatiques auront des répercussions importantes sur le secteur forestier au Canada.

Outre les avantages économiques directs découlant de la récolte de bois et de fibres des forêts canadiennes (Ressources naturelles Canada, 2012a), ces dernières représentent une valeur sur le plan récréatif et culturel, et contiennent également des produits forestiers non ligneux tels que des champignons et des baies. Même s'il s'agit d'un aspect difficile à quantifier, les services écosystémiques offerts par les forêts, comme l'air pur et l'eau potable, le stockage de carbone et les éléments nutritifs des sols, revêtent également une valeur sociale et économique.

Les gouvernements provinciaux et territoriaux ont le pouvoir législatif de gérer le territoire et les ressources dans 77 % des forêts



FIGURE 1 : Régions forestières du Canada (source : Ressources naturelles Canada, 2000).

canadiennes; chaque province et territoire met en place ses propres politiques, lois et autres questions réglementaires. Le gouvernement fédéral est responsable d'un territoire couvrant 16 % de la forêt et le reste (7 %) est détenu par quelque 450 000 propriétaires privés. On récolte annuellement moins de 0,2 % des forêts canadiennes (Ressources naturelles, 2012b). Le secteur forestier canadien a pris un engagement à l'égard de l'aménagement forestier durable et le Canada est un chef de file mondial en matière de certification forestière; 90 % des forêts gérées sont certifiées en fonction d'une ou de plusieurs normes relatives à l'aménagement forestier durable (Ressources naturelles Canada, 2011b; voir l'encadré 1).

La présente section donne un aperçu des principales conclusions liées aux risques que présentent les changements climatiques, aux possibilités et aux mesures d'adaptation qui revêtent de l'importance pour le secteur forestier. Les autres aspects des écosystèmes forestiers du pays sont abordés au 6 – *Biodiversité et aires protégées* du présent rapport.

ENCADRÉ 1

AMÉNAGEMENT FORESTIER DURABLE AU CANADA

L'aménagement forestier durable fait référence à un « aménagement qui maintient et améliore la santé à long terme des écosystèmes forestiers dans l'intérêt de toutes choses vivantes, tout en offrant des possibilités environnementales, économiques, sociales et culturelles aux générations d'aujourd'hui et de demain » (Ressources naturelles Canada, 2012b). Ce genre d'aménagement favorise la gestion responsable des forêts en tant que ressources (p. ex., pour le bois, les services), tout en protégeant leur santé et leur diversité.

Au Canada, le Conseil canadien des ministres des forêts (CCMF) a élaboré un cadre national constitué de critères et d'indicateurs dans le but de décrire, de surveiller et de signaler les tendances et les progrès accomplis vers l'aménagement durable des forêts. Cela comprend des mesures ayant trait à la diversité biologique, à l'état et à la productivité des écosystèmes, aux conditions de l'eau et du sol, aux avantages économiques et sociaux, à l'engagement communautaire et aux responsabilités. À l'échelle nationale, le Canada a recours au *Cadre canadien des critères et indicateurs* pour signaler les progrès accomplis vers l'aménagement forestier durable dans le rapport annuel de *l'État des forêts au Canada* (Ressources naturelles Canada, 2012b).

L'aménagement forestier durable est également soutenu par les provinces et les territoires au moyen de politiques et de lois, et par les organismes forestiers par l'intermédiaire de la certification volontaire, par tierce partie. Le Canada est un chef de file en matière de certification volontaire; en décembre 2011, près de 151 millions d'hectares de forêt avaient été certifiés en fonction des trois programmes de certification en matière d'aménagement forestier durable en vigueur au Canada (APFC, 2012).

3.1 RÉPERCUSSIONS OBSERVÉES ET PRÉVUES

Les répercussions des changements climatiques sur les forêts et les industries du secteur forestier ont déjà été remarquées au Canada. Les effets climatiques les plus visibles sont les changements dans les régimes de perturbation telles les incendies et les infestations de ravageurs forestiers, et ceux associés aux phénomènes météorologiques extrêmes telles la sécheresse ainsi que les tempêtes de vent et de verglas (Lemprière *et al.*, 2008; Williamson *et al.*, 2009), qui peuvent avoir des répercussions socio-économiques immédiates. Cependant, des effets subtils sur la composition des essences d'arbres, les composés phénoliques et la productivité sont de plus en plus souvent rapportés (Johnston *et al.*, 2009) et auront une incidence sur les industries du secteur forestier à plus long terme.

INCENDIES

Les incendies constituent des agents naturels de la dynamique forestière; le feu a détruit plus de trois millions d'hectares de terres forestières en 2009 (Ressources naturelles Canada, 2011a). L'incidence, l'étendue et la gravité des incendies de forêt attribuables aux changements climatiques devraient augmenter dans la plupart des régions canadiennes. Des augmentations de l'ordre de 75 % à 140 % du nombre d'incendies sont prévues d'ici la fin du XXI^e siècle, mais sujet à des variations régionales importantes (Wotton *et al.*, 2010), tandis que les prévisions relatives à la superficie brûlée dans l'Ouest canadien démontrent une augmentation de trois à cinq fois plus élevée d'ici la fin du XXI^e siècle, par rapport à 1991-2000 (Balshi *et al.*, 2009). Les changements climatiques auront également une incidence sur le cycle de la saison des incendies, qui débutera plus tôt et qui sera caractérisé par un pic saisonnier plus tardif des conditions météorologiques propices aux incendies (Le Goff *et al.*, 2009). Des changements dans les régimes d'incendies ont déjà été remarqués; depuis les années 1980, le nombre de gros incendies a augmenté de manière significative dans le nord-ouest (Kasischke et Turetsky, 2006; Girardin, 2007) et dans le nord-est (Le Goff *et al.*, 2007; Ali *et al.*, 2012) du Canada.

ÉPIDÉMIES DE RAVAGEURS ET MALADIES

Les insectes et pathogènes forestiers sont des agents perturbateurs importants qui attaquent des millions d'hectares de forêt au Canada (Ressources naturelles Canada, 2011a). Le climat et les changements climatiques prévus ont une incidence sur la survie et la propagation des ravageurs et des pathogènes, et devraient jouer un rôle dans la modification de leur répartition géographique et leur cycle de vie. Étant donné que la température hivernale est un facteur qui limite la propagation de nombreux ravageurs et pathogènes, la portée et la gravité des maladies et des infestations sont susceptibles d'augmenter à mesure que la température hivernale s'élève (Lemprière *et al.*, 2008; Johnston *et al.*, 2009; Williamson *et al.*, 2009).

L'infestation dévastatrice par le dendroctone du pin ponderosa dans les forêts de l'Ouest canadien a été attribuée dans une grande mesure à une hausse des températures hivernales, à laquelle s'ajoute d'autres facteurs qui y contribuent (voir l'étude de cas 1). La livrée des forêts, la tordeuse des bourgeons de l'épinette et le typographe de l'épinette sont trois autres ravageurs qui s'attaquent aux forêts canadiennes à l'heure actuelle et qui continueront vraisemblablement de les endommager à l'avenir (Price *et al.*, en cours de révision). La capacité à prédire les répercussions

des changements climatiques sur les maladies forestières est restreinte en raison des nombreux facteurs qui doivent être pris en considération tels que l'organisme pathogène, la méthode de propagation (p. ex., le vent, les insectes) et les espèces hôtes. Cependant, les pathogènes dont la présence est généralisée à l'heure actuelle continueront d'avoir une incidence sur les forêts canadiennes dans un contexte de réchauffement climatique (Sturrock *et al.*, 2011).

SÉCHERESSE ET AUTRES PHÉNOMÈNES MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES

À l'échelle mondiale, la fréquence, la durée et la gravité des périodes de sécheresse et de l'exposition au stress thermique devraient augmenter en raison des changements climatiques (Price *et al.*, en cours de révision). Les écosystèmes forestiers semblent déjà montrer des signes d'une hausse de la mortalité des arbres liée à la sécheresse (Allen *et al.*, 2010), aussi bien à l'échelle mondiale que dans les États

ÉTUDE DE CAS 1

L'INFESTATION DE DENDROCTONE DU PIN PONDEROSA

Parmi les effets les plus importants des changements climatiques sur les forêts canadiennes, on peut citer l'infestation de dendroctone du pin ponderosa (*Dendroctonus ponderosae*) survenue dans l'ouest du pays. Le dendroctone du pin ponderosa est un insecte indigène des forêts de pins de l'ouest de l'Amérique du Nord, dont la population augmente périodiquement pour créer des infestations importantes. Au Canada, les populations de dendroctone du pin ponderosa ont depuis longtemps été contrôlées par les épisodes de températures hivernales extrêmes (température inférieure à -35 °C pendant plusieurs jours ou semaines), particulièrement au début de l'hiver (BCMFLNRO, 2012), ayant pour résultat des effets modérés sur les forêts de pin de l'Ouest. Ces épisodes froids sont devenus moins fréquents au cours des dernières années et cela a permis aux populations de dendroctones d'augmenter à un rythme sans précédent. L'abondance de pins tordus latifoliés matures faisant suite à des décennies de diminution de la superficie incendiée (liée aux pratiques de lutte contre les incendies et à une réduction de la durée des conditions météorologiques propices aux incendies) peut aussi avoir contribué à l'infestation massive, laquelle a été jugée la plus importante à survenir, en termes de superficie infestée et de gravité, de toutes celles enregistrées jusqu'ici (Kurz *et al.*, 2008; Girardin et Wotton, 2009; BCMFLNRO, 2012).

En 2012, près de 18,1 millions d'hectares de forêts peuplées en grande partie de pins tordus latifoliés matures ont été attaquées par le dendroctone du pin ponderosa et les changements climatiques constituent probablement un facteur contributif clé, en ce qui a trait à l'étendue et à la gravité de l'infestation (BCMFLNRO, 2012). Dans un premier temps, les taux de possibilité annuelle de coupe ont été augmentés dans les régions les plus fortement touchées par l'infestation du dendroctone du pin ponderosa, afin de répondre au problème posé par la récupération des pins morts et, dans un deuxième temps, ils ont été réduits dans quelques unes des zones d'approvisionnement forestier où la perte annuelle accuse un déclin rapide. Au fur et à mesure que les approvisionnements forestiers se mettront à diminuer, le taux de production des forêts de la Colombie-Britannique et du secteur manufacturier devrait suivre cette tendance à la baisse, phénomène qui risque de se traduire par des pertes d'emplois pour des milliers de travailleurs œuvrant, de façon aussi bien directe qu'indirecte, au sein du secteur forestier (p. ex., International Wood Markets Group, 2010).

Le pin tordu latifolié (*Pinus contorta*) est le principal hôte du dendroctone du pin ponderosa, mais ce dernier peut aussi s'attaquer au pin gris (*Pinus banksiana*), dont la population s'étend de l'Alberta à la Nouvelle-Écosse (Burns et Honkala, 1990). On craint que l'insecte se répande sur toute la forêt boréale canadienne si les frontières climatologiques sont repoussées davantage. Or, contrairement au pin tordu latifolié, les populations de pin gris sont dispersées sur l'ensemble du territoire, ce qui pourrait affaiblir la capacité du dendroctone du pin ponderosa de migrer vers de nouveaux peuplements forestiers et, par conséquent, réduire la possibilité d'une infestation massive qui s'étendrait jusque dans l'est du pays (Cullingham *et al.*, 2011). On juge que le pic de l'infestation est passé à l'heure actuelle, même si l'étendue de la zone infestée continue de progresser (BCMFLNRO, 2012). Depuis 2008, l'expansion s'est poursuivie vers le nord et vers l'est dans la forêt boréale (figure 2). En 2011, on a noté la présence du dendroctone du pin ponderosa à 80 km de la frontière du Yukon et signalé des arbres nouvellement attaqués dans le nord de l'Alberta, tout près de la frontière avec la Saskatchewan (Cullingham *et al.*, 2011).

Au cours des dix années qu'a duré l'épidémie, le gouvernement de la Colombie-Britannique et le gouvernement fédéral ont investi des centaines de millions de dollars en vue d'atténuer les effets de l'infestation, de créer des débouchés pour le pin récupéré et d'élaborer des stratégies économiques pour l'avenir (BCMFLNRO, 2012). Au départ, on cherchait surtout à empêcher l'infestation de se répandre et à récolter les peuplements infestés et vulnérables. Alors que l'infestation se poursuivait, les efforts en vue d'utiliser le bois tué par le dendroctone se sont intensifiés (BCMFLNRO, 2012). On cite en exemple l'utilisation, aux fins de revêtement intérieur, du bois teinté bleu par le champignon transmis par le dendroctone (Zaturecky et Chiu, 2005). Le bois récupéré est aussi utilisé en tant que source de bioénergie (BCMFLNRO, 2012).

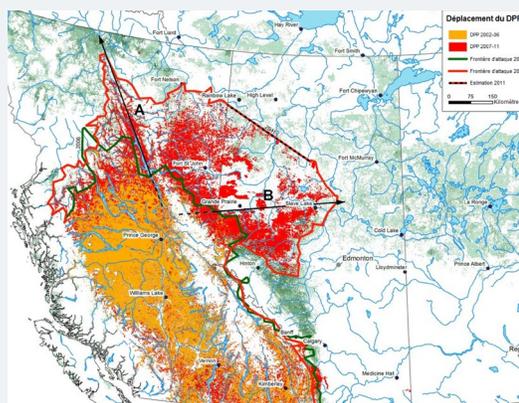


FIGURE 2 : Aires de répartition du dendroctone du pin ponderosa, montrant les changements survenus entre 2002 et 2006 et entre 2007 et 2011, ainsi que la nature des changements (source : Ressources naturelles Canada, 2012c).

américains du nord-ouest bordés par le Pacifique (Van Mantgem *et al.*, 2009) et dans les forêts boréales du Canada (Peng *et al.*, 2011). La région des Prairies a connu une sécheresse d'une gravité exceptionnelle en 2001-2002, ce qui aurait causé un dépérissement de la cime et un déclin des populations de peuplier faux-tremble, menant à un taux de mortalité de plus de 20 % supérieur à la moyenne à long terme (Michaelian *et al.*, 2011). On a aussi établi un rapport entre l'humidité disponible et la croissance et la productivité des forêts, puisque le stress lié au manque d'humidité entraîne une diminution de la croissance radiale annuelle dans un grand nombre de régions et sur différentes espèces, notamment l'épinette blanche, l'épinette noire, le peuplier faux-tremble et le pin tordu latifolié (Barber *et al.*, 2000; Chhin *et al.*, 2008; Girardin *et al.*, 2008; Hogg *et al.*, 2008).

Les épisodes de vent extrême devraient augmenter en raison des changements climatiques (p. ex., Haughian *et al.*, 2012). On note, parmi les exemples d'effets causés par un épisode de vent extrême sur les forêts, les dommages très étendus causés par l'ouragan Juan sur les terres forestières publiques et les petits boisés privés en Nouvelle-Écosse à l'automne 2003 (McGrath et Ellingsen, 2009), ainsi que la destruction de forêts anciennes et de jeunes peuplements forestiers dans les basses-terres continentales de la Colombie-Britannique, laquelle fut causée par une tempête de vent survenue en décembre 2006 qui a touché plus de 40 hectares du parc Stanley, une destination clé pour les activités récréatives en plein-air à Vancouver. Même si les coûts associés à la restauration du parc après la tempête ont dépassé les 10 millions de dollars, ces efforts ont servi à accroître la participation du public et à replanter une forêt plus résiliente (Ville de Vancouver, 2012).

CHANGEMENTS DANS LA COMPOSITION

Le climat influe considérablement sur la répartition des essences. À mesure qu'il change, les enveloppes climatiques des essences d'arbres canadiennes avancent de quelques degrés de latitude vers le nord et s'étendent à de plus hautes altitudes sur les versants (*voir le chapitre 6 – Biodiversité et aires protégées*). Bien qu'un degré élevé d'incertitude soit associé aux prévisions relatives aux changements des aires de répartition (McKenney *et al.*, 2011), le rythme du changement au niveau des enveloppes climatiques de la plupart des essences d'arbres nord-américaines pourrait s'avérer plus rapide, par au moins un facteur de dix, que la vitesse de migration potentielle (McKenney *et al.*, 2007; McKenney *et al.*, 2011), soulevant ainsi la possibilité que l'évolution de la niche climatique des espèces ne progresse plus rapidement que leur évolution naturelle. D'autres facteurs de stress locaux, comme la sécheresse, les perturbations et la concurrence avec d'autres espèces, pourraient interagir avec les facteurs climatiques et réduire le potentiel de migration, phénomène qui contribuerait à créer un plus grand écart entre l'évolution de la niche climatique et l'aire de répartition actuelle de l'essence (Mohan *et al.*, 2009).

CHANGEMENTS AU NIVEAU DE LA PRODUCTIVITÉ

Les saisons de croissance se sont allongées au cours des dernières décennies. En effet, on observe que les phénomènes phénologiques printaniers, comme les périodes de débournement et de désendurcissement des épinettes, surviennent plus tôt dans l'année. Par exemple, la floraison du peuplier faux-tremble en Alberta a gagné deux semaines entre 1936 et 2006 (Beaubien et Hamann, 2011). Un climat plus chaud et une saison de croissance plus longue peuvent être utiles aux populations de la partie nord de l'étendue des essences, comme le prouvent les populations de peupliers faux-tremble dans l'est du Canada (Lapointe-Garant *et al.*, 2009). Les populations situées

plus au sud peuvent connaître une croissance neutre ou réduite dans des conditions de réchauffement climatique (Ma *et al.*, 2012) et peuvent ne connaître une augmentation de la croissance que dans des conditions idéales, ou lorsque les arbres sont jeunes (Girardin *et al.*, 2012). Des saisons de croissance précoces peuvent également hausser le risque d'exposition au gel (Beaubien et Hamann, 2011), limitant ainsi les avantages sur le plan de la productivité. L'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère peut également entraîner une hausse modérée de la productivité dans certaines circonstances telles celles qui peuvent se présenter aux endroits où l'eau et les nutriments ne sont pas limitatifs et la concurrence est faible (Soulé et Knapp, 2006; Wang *et al.*, 2006).

RÉPERCUSSIONS SOCIO-ÉCONOMIQUES

Les effets combinés des changements climatiques sur les forêts se répercuteront sur la qualité et la quantité de l'approvisionnement en bois d'œuvre et auront d'importantes conséquences financières sur les industries du secteur forestier (TRNEE, 2011). Ces effets mettront en évidence de fortes variations régionales, dont les coûts potentiels découleront de la réduction de l'approvisionnement en bois d'œuvre (Ochuodho *et al.*, 2012) et du raccourcissement des saisons de récolte hivernale (lorsque les coûts d'exploitation sont plus faibles et que la perturbation des sols est minimisée; Johnston *et al.*, 2009; Ogden et Innes, 2009). Les conséquences économiques dépassent aussi les effets prévus sur l'approvisionnement en bois d'œuvre, puisque les changements climatiques auront également des répercussions sur les industries qui dépendent des récoltes de bois tels les secteurs manufacturier et de la construction. Dans le rapport rédigé par Lempière *et al.* (2008), les auteurs résument les effets à court, moyen et long terme des changements climatiques sur la quantité et la qualité de l'approvisionnement en bois d'œuvre au Canada, ainsi qu'au niveau de l'offre et de la demande à l'échelle internationale.

Les incendies de forêt constituent une menace pour la santé, la sûreté et la sécurité humaines (*voir le chapitre 7 – Santé humaine*). À titre d'exemple de dommages financiers causés par un incendie de forêt, on estime que l'incendie de Slave Lake, survenu en Alberta en 2011, a entraîné des réclamations de l'ordre de 742 millions de dollars en demandes de règlement (Flat Top Complex Wildfire Review Committee, 2012). L'augmentation prévue du nombre d'incendies liés aux changements climatiques se traduira par des frais supplémentaires au niveau de la protection et de l'évacuation des collectivités. On estime qu'on ne dispose que d'une décennie ou deux avant que l'augmentation de l'activité des incendies ne dépasse la capacité des organismes de gestion des feux à maintenir les niveaux actuels d'efficacité (Flannigan *et al.*, 2009).

Les collectivités forestières dépendent beaucoup des forêts pour leurs emplois, leurs revenus et d'autres biens et services telles les activités récréatives à l'extérieur. Une hausse du nombre d'incendies de forêt, d'infestations de ravageurs et de phénomènes météorologiques extrêmes se traduira par une diminution des peuplements forestiers pouvant être gérés de manière durable. Les coûts associés à la surveillance et à la protection peuvent devenir prohibitifs dans certaines régions et contribuer à la réduction ou à la disparition des économies forestières locales.

Les analyses des effets des changements climatiques sur l'ensemble de l'économie dans le secteur forestier doivent tenir compte des facteurs de stress de nature non climatique tels que la demande des consommateurs, la main d'œuvre, l'offre de capitaux et les marchés pour les intrants et les extrants de production (TRNEE, 2011).

EFFETS SUR LE STOCKAGE DU CARBONE

Les changements climatiques ont aussi des effets sur les services écologiques offerts par la forêt, comme la conservation et l'épuration de l'eau, la biodiversité et le stockage du carbone. L'importance des écosystèmes forestiers dans l'atténuation des effets des changements climatiques grâce au stockage du carbone est de plus en plus reconnue et valorisée (Pan *et al.*, 2011). Les perturbations peuvent avoir d'importantes répercussions sur les stocks et les flux de carbone (Hicke *et al.*, 2012); ainsi, l'intensification prévue de la sécheresse et du nombre d'incendies et de perturbations causées par les ravageurs diminuerait la capacité de stockage de carbone des forêts au Canada (Amiro *et al.*, 2009; Michaelian *et al.*, 2011). Par exemple, les résultats publiés dans le rapport de Kurz *et al.* (2008) permettent de conclure que, d'ici 2020, les arbres tués par le dendroctone du pin ponderosa dans l'Ouest canadien auront libéré près d'un milliard de tonnes de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, ce qui équivaut à cinq années d'émissions provenant du secteur des transports canadien.

3.2 ADAPTATION

Les changements climatiques posent des défis aux gestionnaires forestiers canadiens. Les décisions que ces derniers prennent aujourd'hui se répercuteront sur les forêts pendant plus de 100 ans, étant donné la longue durée de croissance des essences d'arbres. Les arbres peuvent s'adapter à un certain degré de changement dans leur environnement grâce à leur capacité d'adaptation physiologique ou génétique (Aitken *et al.*, 2008), mais l'ampleur des changements climatiques futurs pourrait dépasser la capacité des forêts à s'adapter suffisamment pour maintenir le niveau actuel de biens et de services offerts à la société. Par conséquent, des stratégies d'adaptation forestière seront nécessaires pour maintenir la compétitivité et la durabilité du secteur forestier au Canada. L'industrie forestière canadienne fait face depuis quelque temps à d'importants défis économiques, qui ont entraîné des pertes d'emplois, la fermeture des scieries ainsi qu'un ralentissement général dans le secteur forestier. Des mesures d'adaptation efficaces doivent prendre en considération tous ces facteurs de changement dans le secteur forestier.

Bon nombre d'articles et de rapports (p. ex., Millar *et al.*, 2007; Ogden et Innes, 2007; Bernier et Schoene, 2009; Johnston *et al.*, 2009; Gauthier *et al.*, *en cours de révision*) traitent des options qui s'offrent au secteur forestier en matière d'adaptation et il existe de nombreux exemples en ce qui concerne les mesures d'adaptation qui ont été mises en œuvre (p. ex., voir l'étude de cas 2).

La question de l'adaptation du secteur forestier au Canada a retenu l'attention politique lorsque le Conseil canadien des ministres des forêts (CCMF; CCMF, 2008) a établi que les changements climatiques constituaient l'une des deux priorités à l'échelle nationale et a indiqué qu'il était nécessaire de tenir compte des changements climatiques et des éventuelles variations climatiques dans tous les aspects de l'aménagement forestier durable. Le CCMF a ensuite réalisé des études d'évaluation de la vulnérabilité et de la capacité d'adaptation de divers écosystèmes forestiers, des activités d'aménagement forestier et du milieu politique (Johnston et Edwards, sous presse; voir l'étude de cas 3).

ÉTUDE DE CAS 2

MIGRATION ASSISTÉE

La migration assistée est définie comme étant le déplacement des espèces par l'humain en raison des changements climatiques (Ste-Marie *et al.*, 2011). Il s'agit d'une option d'adaptation qui est de plus en plus envisagée afin de maintenir la biodiversité, la santé et la productivité des forêts canadiennes dans le contexte des changements climatiques. Cette approche peut être utilisée pour répondre à des objectifs de conservation (p. ex., pour sauver les espèces) et de foresterie (p. ex., pour maintenir la santé et la productivité des peuplements). En raison de l'état des connaissances actuelles et des pratiques exemplaires en place, la migration assistée est plus facilement réalisable dans le cas des principales essences commerciales que dans le cas des espèces préoccupantes du point de vue de la conservation (Pedlar *et al.*, 2012).

De nombreuses autorités ont adopté des directives en matière de transfert de semences qui recommandent l'endroit où les semences provenant de certaines zones géographiques devraient être plantées afin de s'assurer qu'elles s'adapteront à leur nouvel environnement. Certaines autorités canadiennes ont commencé à mettre en œuvre la migration assistée de populations et d'essences d'arbres à petite échelle, en modifiant les directives face aux changements climatiques observés et prévus. Les projets de migration assistée des essences commerciales, auxquels on procède actuellement, prévoient le déplacement des semences dans les limites de leur aire de distribution actuelle, ou légèrement en dehors de celles-ci. Par exemple, en Colombie-Britannique, les zones de transfert de semences de la plupart des essences ont été étendues de 100 à 200 mètres en altitude au-delà de leurs zones actuelles (BCMLFNRO, 2008) et de nouvelles politiques ont été mises en place afin de permettre la plantation du mélèze de l'Ouest à l'extérieur de son aire de distribution actuelle (BCMLFNRO, 2010). Grâce à un système de demande de dérogation, les zones de transfert de semences de la plupart des espèces de conifères ont été étendues de 200 mètres en altitude et de deux degrés en latitude vers le Nord en Alberta (S. Kavalinas, Alberta Environment and Sustainable Resource Development, communication personnelle). Les semences de vergers à graines cultivées dans le sud peuvent représenter jusqu'à 20 % du matériel de reboisement dans les forêts commerciales du nord du Québec (André Deshaies, ministère des Ressources naturelles du Québec, communication personnelle).

ÉTUDE DE CAS 3

ANALYSE DES ÉVALUATIONS DE LA VULNÉRABILITÉ DU SECTEUR FORESTIER

Entre 2008 et 2012, le Conseil canadien des ministres des forêts (CCMF) a réalisé une étude sur la vulnérabilité du secteur forestier canadien aux changements climatiques. Un résumé des douze études de cas sur la vulnérabilité menées à l'échelle du pays constituait l'un des éléments de l'analyse (figure 3). Les objectifs de ces études variaient considérablement, qu'il s'agisse de la modélisation biophysique dans l'une ou de l'analyse de politiques, d'évaluations communautaires ou de l'intégration des changements climatiques au processus de planification de l'aménagement forestier dans d'autres. L'importance perçue des changements climatiques par rapport à d'autres enjeux varie également considérablement d'une étude à l'autre: dans certaines, elle importait peu, alors que dans d'autres, elle revêtait une extrême importance.



FIGURE 3 : Sites des études d'évaluation sur la vulnérabilité réalisées par le CCFM. ESRD = Environment and Resource Development (Alberta), ICAR = Initiatives de collaboration pour l'adaptation régionale (Ressources naturelles Canada) (source: Johnston et Edwards, 2013).

Outre l'analyse technique, les principaux résultats des évaluations de la vulnérabilité préconisent :

- de sensibiliser davantage les nombreux acteurs concernés au rôle joué par les changements climatiques et de faciliter l'établissement de liens solides entre les praticiens et les modélisateurs;
- de renforcer les capacités en matière d'aménagement forestier et d'accroître le niveau de compréhension au sujet des vulnérabilités afin de jeter les bases des prochains travaux sur l'adaptation car, même si certaines études de cas contenaient des options d'adaptation, on note que, de façon générale, ce concept n'est pas bien compris;
- d'élaborer des approches de modélisation intégrée multi-échelle étayées par les observations des groupes d'intervenants et susceptibles d'accroître le niveau de connaissances scientifiques auxquelles l'aménagement forestier pourra avoir recours à l'avenir;
- de permettre aux participants de mieux comprendre l'incertitude associée aux projections climatiques futures.

L'analyse des études de cas a également permis à Johnston et Edwards (*sous presse*) de cerner les facteurs qui ont permis de mener des évaluations de la vulnérabilité réussies. Ces facteurs, qui peuvent servir dans le cadre d'autres initiatives, sont les suivants :

- des ressources financières et humaines adéquates, y compris des experts et des dirigeants locaux;
- des rapports d'analyses précédentes qui énumèrent, dans une certaine mesure, les effets probables et les préoccupations existantes des décideurs locaux concernant les effets des changements climatiques et les mesures à prendre pour les atténuer;
- des données techniques génériques élaborées (climat, écosystèmes) permettant aux équipes d'évaluation de la vulnérabilité de progresser rapidement;
- la disponibilité de l'expertise dans le domaine des sciences naturelles et des sciences sociales afin d'établir des rapports entre les systèmes biophysiques et humains;
- le choix d'un champion – quelqu'un qui s'investit personnellement dans le projet, souvent le dirigeant de la collectivité locale – dont le rôle consiste à faciliter le dialogue entre scientifiques, intervenants et praticiens;
- des mécanismes qui faciliteront l'intégration des connaissances locales ou traditionnelles à la science;
- un accent initial mis sur les vulnérabilités actuelles, étape qui aide à établir et à combler les lacunes sur le plan des connaissances au début du processus.

OBSTACLES ET DIFFICULTÉS ASSOCIÉS À L'ADAPTATION

Des exemples notoires et à grande échelle des effets des changements climatiques telle l'infestation de dendroctone du pin ponderosa, et des phénomènes météorologiques extrêmes tels les grands incendies de forêt à Kelowna, en Colombie-Britannique, en 2003, et à Slave Lake, en Alberta, en 2011, ont sensibilisé les intervenants forestiers aux questions d'adaptation aux changements climatiques. Le gouvernement et l'industrie ont abandonné la stratégie de « gestion de crise » pour adopter une approche de « gestion adaptative » dans le but d'aborder les risques de façon proactive et de tirer profit du potentiel que présentent les changements climatiques (Johnston et Hessel, 2012). Or, en l'absence de mesures d'incitation économiques en faveur de l'adaptation, les entreprises auront peut-être de la difficulté à absorber les coûts à court terme, malgré les bénéfices qu'elles risquent de réaliser à long terme (TRNEE, 2012a). Même si les pressions économiques sur le secteur forestier au Canada peuvent limiter la capacité de l'industrie à accorder une attention particulière à l'adaptation en vue de contrer les effets des changements climatiques et à investir dans ce domaine, de nombreuses stratégies de gestion adaptative peuvent également servir à aborder les autres facteurs de stress de nature non climatique et contribuer à renforcer la résilience du système.

D'importantes incertitudes persistent au sujet des conditions climatiques futures (Trenberth, 2010), des effets multiples en interaction des changements climatiques sur les écosystèmes forestiers complexes et de la réaction de la forêt à ces changements. Le niveau de compréhension scientifique au sujet des répercussions des changements climatiques passés et à venir sur les forêts canadiennes a augmenté de manière substantielle au cours des dix dernières années, mais les données ne sont pas toujours disponibles, accessibles ou applicables aux utilisateurs éventuels (Johnston et Hessel, 2012). En fait, certains intervenants du secteur forestier au Canada ont souligné que la compréhension des éventuelles options d'adaptation est considérée comme une lacune sur le plan des connaissances et un obstacle à l'action (TRNEE, 2012a). Des réseaux d'intervenants en matière d'adaptation aux changements climatiques telle la

Communauté de pratique en adaptation forestière (www.ccadaptation.ca/fr/landing), se sont formés pour relever le défi en partageant les connaissances et les pratiques exemplaires.

La difficulté d'attribuer sans équivoque aux changements climatiques les répercussions remarquées dans des systèmes forestiers qui sont soumis à de nombreux facteurs de stress est parfois perçue comme un obstacle à l'adaptation (Lemprière *et al.*, 2008). Le fait de générer de longues séries temporelles à partir d'un suivi multi-échelle permet de détecter et de quantifier les changements en milieu forestier liés au climat, ce qui facilite la validation des modèles et la prise de décisions en toute connaissance de cause. L'intégration des mesures relevées sur le terrain aux données obtenues par télédétection permet d'élargir l'ampleur et la portée de la capacité du Canada à suivre les changements en milieu forestier. L'intégration des connaissances scientifiques à l'ensemble des disciplines permettra aussi d'en arriver à une compréhension plus intégrée des vulnérabilités de la forêt et du secteur forestier aux changements climatiques.

L'adaptation devrait être considérée comme un élément essentiel de l'aménagement forestier durable étant donné que les changements climatiques rendent problématique la réalisation des objectifs en la matière. Par exemple, les critères et indicateurs en matière d'aménagement forestier durable adoptés par le CCMF (2006) seront peut-être difficiles, voire impossibles, à atteindre parce qu'ils ne tiennent pas compte des effets des changements climatiques. Une analyse de la série de critères et d'indicateurs réalisée par Steenberg *et al.* (2012) propose d'ajouter des indicateurs et de les réexaminer et de les adapter dans le contexte des changements climatiques. Des normes de certification établies pour l'aménagement forestier durable pourraient constituer un instrument pouvant servir à intégrer les changements climatiques à la prise de décisions dans le secteur forestier. Redéfinir l'aménagement forestier durable dans le but d'incorporer les changements climatiques sera sans nul doute un processus complexe, auquel participeront de nombreux intervenants, et nécessitera des analyses de compromis détaillées, afin de préciser la fourchette des valeurs forestières qui seront représentées.

4. EXPLOITATION MINIÈRE

Le secteur minier canadien emploie environ 401 315 personnes dans les secteurs de l'extraction minérale et les secteurs à valeur ajoutée que sont ceux de la fonte, de la transformation et de la fabrication, et son apport au produit intérieur brut du Canada s'est élevé à quelque 60 milliards de dollars en 2012 (Ressources naturelles Canada, 2013a). En 2010, près de 968 établissements miniers, dont 71 mines métallifères et 897 mines non métallifères, étaient exploités en grappes industrielles dans plus de 120 petites et moyennes collectivités canadiennes et dans leurs environs, principalement en Ontario, au Québec et en Colombie-Britannique (figure 4). L'exploitation minière contribue également aux économies des grandes villes. La Bourse de Toronto a traité 83 % des opérations mondiales par actions ordinaires dans le secteur minier au cours des six dernières années. Plusieurs grappes de sociétés d'exploration se sont implantées à Vancouver, alors que les alumineries et les usines de minerai de fer se sont établies à Montréal et les usines d'uranium et de potasse, à Saskatoon (Stothart, 2011).

L'exploitation minière contribue aux économies de toutes les provinces et territoires (tableau 3). Cette contribution économique varie considérablement au fil du temps en fonction du nombre de mines en exploitation et de la valeur du bien produit. Selon l'Association minière du Canada, l'industrie prévoit investir plus de 140 millions de dollars en projets au cours des dix prochaines années (Marshall, 2012). Cette croissance prévue présente des occasions d'intégrer des mesures d'adaptation aux activités d'exploration minière, à la construction des mines et aux activités d'exploitation, de transports et de fermeture.

Les responsables des activités minières au Canada doivent depuis longtemps composer avec la variabilité climatique, mais au cours des dernières années, ils ont dû faire face à une incidence croissante de dangers de nature climatique, dont certains dépendent probablement des changements climatiques (Lemmen *et al.*, 2008a; Pearce *et al.*, 2011; Stratos, 2011; IMG-Golder Corporation, 2012; TRNEE, 2012a). Les changements climatiques posent un risque opérationnel,

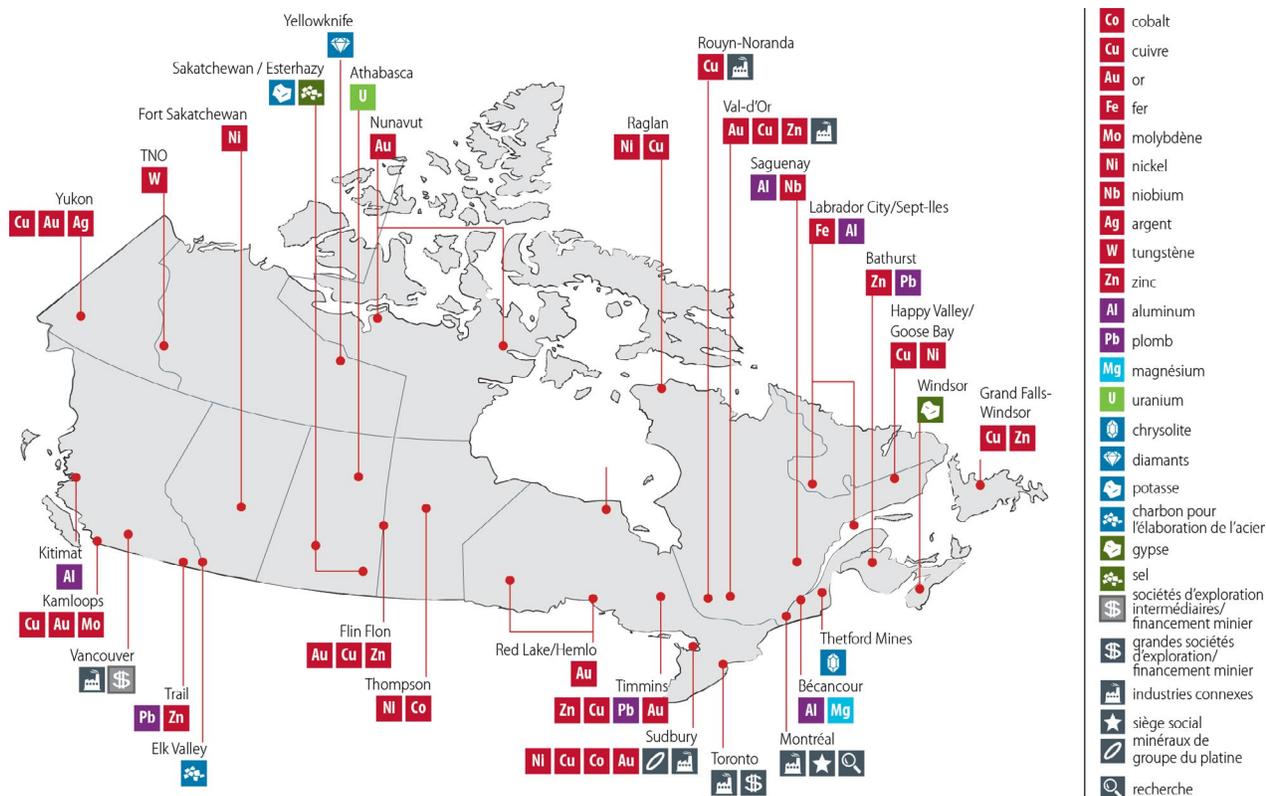


FIGURE 4 : Grappes industrielles dans le secteur minier au Canada (extrait modifié tiré de Stothart, 2011).

lié à l'image que se fait le public de l'engagement d'une entreprise en faveur des mesures d'atténuation (Pearce *et al.*, 2009). Ils offrent également de nouvelles possibilités dans les domaines de l'exploration et de l'aménagement des mines, qui découlent d'un meilleur accès aux ressources et des nouvelles options de transport (Lemmen *et al.*, 2008a; Prowse *et al.*, 2009; Pearce *et al.*, 2011; TRNEE, 2012a). La mesure selon laquelle le secteur minier est capable de réduire son effet sur le climat, de s'adapter aux changements climatiques et de profiter des occasions qui se présentent aura une incidence sur son succès à long terme, ainsi que des conséquences économiques et environnementales sur les collectivités d'accueil et le pays.

La plupart des études disponibles sur les effets des changements climatiques et l'adaptation dans le secteur minier portent sur les activités entreprises en régions nordiques et des enjeux tels l'intégrité du pergélisol, le réseau de transport hivernal, la gestion de l'eau et la possibilité d'utiliser les voies maritimes de l'Arctique en raison de la fonte de la glace marine. On ne dispose que de peu de données au sujet des effets des changements climatiques et de l'adaptation en ce qui a trait aux activités minières dans le sud du Canada, malgré la concentration de mines situées au sud du 60° parallèle (sur les 196 principales mines productrices qui figurent dans la liste dressée par Ressources naturelles Canada (2012d), seules huit sont situées dans les territoires nordiques). La discussion présentée dans cette section est sujette aux restrictions que lui imposent les limites de l'information disponible.

Province/territoire	Valeur de la production minière par province et par territoire, en 2000 et en 2010 (en millions de \$)	
	2000	2010
Terre-Neuve-et-Labrador	967,1	4584,0
Île-du-Prince-Édouard	5,5	3,4
Nouvelle-Écosse	295,2	294,2
Nouveau-Brunswick	772,5	1154,6
Québec	3653,2	6770,5
Ontario	5711,4	7691,7
Manitoba	1268,8	1663,5
Saskatchewan	2282,6	7084,0
Alberta	1064,4	2347,3
Colombie-Britannique	2891,5	7073,8
Yukon	56,2	284,1
Territoires du Nord-Ouest	681,7	2032,7
Nunavut	384,6	305,1
TOTAL	20 034,7	41 288,9

TABLEAU 3 : Valeur (en millions de dollars) de la production minière par province et par territoire, en 2000 et en 2010 (tiré de Stothart, 2011).

4.1 EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET OPTIONS D'ADAPTATION

Les changements climatiques ont des conséquences sur toutes les étapes de l'activité minière, y compris la planification, les activités actuelles et futures et les activités post-exploitation. Les études ont permis de relever de nombreux aspects de l'exploitation minière qui sont actuellement touchés par la fluctuation des conditions climatiques, y compris : a) l'infrastructure existante, b) l'infrastructure de transport, c) l'extraction et la transformation et d) les activités quotidiennes.

INFRASTRUCTURE EXISTANTE

La dégradation du pergélisol et l'instabilité du sol qui en découle, les changements touchant le cycle hydrique et les phénomènes météorologiques extrêmes posent des défis lorsqu'il s'agit de concevoir, de construire, d'exploiter et de fermer l'infrastructure de la mine (Instanes *et al.*, 2005; Furgal et Prowse, 2008; Prowse *et al.*, 2009). Auparavant, la conception technique ne tenait pas compte des changements climatiques et la plupart des infrastructures des mines étaient construites pour résister aux normes et conditions climatiques en vigueur au moment de la construction. Les structures érigées avant la fin des années 1990 et certaines construites après cette date (p. ex., routes, pistes d'atterrissage, immeubles, bermes, digues à stériles et bassins de retenue) peuvent être sensibles à l'augmentation de la profondeur de dégel et du tassement dû au dégel au-delà des valeurs du plan d'origine en raison des changements climatiques, ce qui pourrait entraîner une hausse des coûts d'entretien et nécessiter des travaux d'assainissement afin de garantir l'intégrité structurelle (Prowse *et al.*, 2009). La dégradation du pergélisol pourrait aussi compromettre la stabilité et l'efficacité des structures telles que les barrages et la couverture des déchets, soit des problèmes qui peuvent être à l'origine du rejet de contaminants dans l'environnement (Pearce *et al.*, 2011; Stratos, 2011).

L'évolution des phénomènes météorologiques extrêmes a déjà contraint certaines infrastructures à dépasser leurs capacités d'exploitation prévues. Les perturbations du cycle hydrique, en particulier les épisodes de précipitations extrêmes et les changements au niveau de la fonte, ont causé une hausse des débits fluviaux pouvant dépasser la capacité des ouvrages de gestion de l'eau. Par exemple, les pluies torrentielles qui se sont abattues sur le Yukon ont contraint une mine d'or et de cuivre à rejeter, à de nombreuses reprises, de l'eau non traitée dans le réseau hydrographique du fleuve Yukon, violant ainsi les normes du permis d'exploitation de l'eau en vigueur dans ce territoire (Pearce *et al.*, 2011). La stabilité des pentes et l'intégrité des bermes qui ont été construites peuvent également être compromises par un épisode de précipitation extrême (Chiotti et Lavender, 2008). L'érosion des pentes à proximité des barrages ou le ravinement à la base des ouvrages de retenue peuvent survenir, causant de l'instabilité dans la structure du barrage et augmentant le risque de rupture. Des ruptures de digues à stériles, causées par de fortes pluies et des inondations, ont été documentées à l'échelle internationale (CIGB, 2001; WISE, 2006).

Des risques de défaillance structurale causés par les changements climatiques et les phénomènes météorologiques extrêmes ont également été remarqués partout au Canada, et surtout dans le Nord, dans des mines dont l'exploitation était terminée. Des installations de confinement des déchets, construites il y a plusieurs dizaines d'années, n'ont pas été conçues pour résister aux conditions plus chaudes qui prévalent aujourd'hui. La rupture des barrages à noyau gelé des bassins de retenue érigés sur certains sites et la dégradation du pergélisol qui se trouve sous le terril ont déjà causé de l'érosion non prévue et le rejet de contaminants dans l'environnement immédiat (Stratos, 2011). Il est probable que le scénario se répète dans d'autres sites d'exploitation minière au Canada (Pearce *et al.*, 2011).

L'adaptation des infrastructures minières aux changements climatiques nécessite une analyse des caractéristiques techniques, dans le cas des nouvelles mines, et des travaux d'assainissement dans celui des mines existantes, ou celles dont l'exploitation est terminée, en vue d'en garantir l'intégrité structurale. La prise en considération des changements climatiques à l'étape de conception des mines fait ordinairement partie du processus d'évaluation environnementale au Canada et les responsables à l'exploitation disposent de ressources comme le Code de pratiques écologiques pour les mines de métaux (Environnement Canada, 2009) pour les aider à composer avec les changements climatiques (Prowse *et al.*, 2009). Par exemple, le rapport indique que les installations de drainage superficiel doivent être conçues de façon à résister à des conditions de pointe au moins équivalentes à une crue à période de récurrence de 100 ans en vue de tenir compte des augmentations prévues du nombre de phénomènes météorologiques extrêmes causés par les changements climatiques (Environnement Canada, 2009). L'Association canadienne de normalisation a également rédigé un guide technique sur la construction des infrastructures dans les zones de pergélisol (Auld *et al.*, 2010). Ce guide s'applique aux nouveaux projets d'infrastructure et donne des suggestions en vue de déterminer la façon d'évaluer et de tenir compte des effets potentiels des changements climatiques sur le pergélisol et sur les fondations des structures construites dans des zones où celui-ci peut être présent.

Des techniques de conception et de gestion servent à protéger les infrastructures contre les effets du réchauffement du pergélisol, y compris des fondations sur pieux plus profondes, des assises en gravier plus épaisses (pour isoler la surface), des fondations réglables, des systèmes de refroidissement artificiel, des thermosiphons (pour évacuer l'air chaud qui circule autour des fondations et garantir une température du sol plus froide), l'enlèvement de la neige autour des fondations (pour obtenir des températures hivernales au sol plus froides) et le recours à des concepts de couverture de résidus plus résistante (épaisseur de la couverture, utilisation de matériaux géosynthétiques; Pearce *et al.*, 2009; Prowse *et al.*, 2009). Le fait de surveiller le fonctionnement de ces méthodes d'adaptation et de les adapter en conséquence contribue à garantir la durabilité et l'efficacité.

La durée de vie des mines se prolonge bien au-delà de l'arrêt des opérations et les structures laissées sur place après la fermeture devront résister aux changements climatiques futurs. Il est probable que les structures qui ont déjà été abandonnées, y compris les bassins de retenue et les haldes de stériles, n'ont pas été conçues pour résister à l'ensemble des conditions climatiques changeantes et si aucune mesure n'est prise, certains sites pourraient présenter des risques importants pour l'environnement et la santé des collectivités environnantes (Pearce *et al.*, 2011).

INFRASTRUCTURE DE TRANSPORT

Les exploitations minières qui dépendent des infrastructures de transport sensibles au climat, comme les routes d'hiver et le transport maritime et en eau douce, sont particulièrement vulnérables aux tendances au réchauffement signalées à l'échelle du pays et particulièrement dans le Nord (Furgal et Prowse, 2008; Prowse *et al.*, 2009). Les routes saisonnières aménagées sur la glace dans les Territoires du Nord-Ouest ne sont plus aussi fiables que par le passé, en raison des hivers plus doux (Prowse *et al.*, 2009; Stratos, 2009; Pearce *et al.*, 2011; voir aussi le chapitre 8 – *Infrastructure hydraulique et infrastructure de transport*). La route d'hiver entre Tibbitt et Contwoyto située au nord et à l'est de Yellowknife (Territoires du Nord-Ouest) est la plus longue route d'hiver du Canada et s'étend sur 600 km, dont plus de 80 % (495 km) sur des lacs gelés. Il s'agit de la principale route de ravitaillement pour les mines de diamants Ekati, Diavik, Jericho et Snap Lake, pour la mine d'or Lupin (inactive à l'heure actuelle) et pour plusieurs autres projets d'exploration minière (Prowse

et al., 2009). Au cours des dernières années, la période d'utilisation de la route d'hiver a été écourtée et l'épaisseur de la glace sur laquelle elle est construite a diminué, ce qui limite le poids du chargement pouvant être transporté de manière sécuritaire (Prowse et al., 2009). Les coûts financiers associés au raccourcissement de la saison d'utilisation des routes de glace sont considérables. Par exemple, en 2006, la route a été praticable pendant 42 jours seulement (comparativement à 70 jours pour l'année précédente), contraignant la mine de diamants Diavik à dépenser 11,25 millions de dollars supplémentaires pour transporter 15 millions de litres de carburant par avion (Pearce et al., 2011).

Les exploitants routiers ont adopté des mesures d'adaptation et ont notamment acheté de la nouvelle machinerie amphibie plus légère dans le but de faciliter la construction de la route plus tôt dans la saison. De plus, on a tracé d'autres itinéraires et amélioré l'efficacité opérationnelle en concentrant tous les transports par camion pendant la période hivernale, alors que la glace est à son épaisseur maximale (Pearce et al., 2009). On étudie également des solutions de rechange à la route de glace, notamment la construction d'une route terrestre saisonnière vers les mines de diamants, et le projet d'aménagement routier et portuaire à

Bathurst Inlet, qui relierait les sites miniers des Territoires du Nord-Ouest et du Nunavut à la côte continentale nord.

Les entreprises minières estiment que l'évolution des changements climatiques leur offre une occasion en ce qui concerne les changements au niveau de la couverture de glace marine et le transport maritime. Le prolongement de la saison estivale de transport fluvial et l'ouverture de nouvelles routes maritimes dans l'Arctique peuvent contribuer à l'amélioration de la viabilité économique de certaines exploitations minières dans le Nord. Par exemple, la poursuite du réchauffement devrait permettre une plus grande accessibilité au passage du Nord-Ouest et ainsi prolonger la saison de navigation ou, éventuellement, permettre l'ouverture de la voie à longueur d'année (Leong et al., 2005; Prowse et al., 2009). Or, à court terme, les risques posés par la glace demeureront élevés en raison du mouvement plus rapide des banquises dans l'archipel de l'Arctique (Prowse et al., 2009; voir aussi le chapitre 2). Les facteurs non climatiques tels les frais d'assurance, la vitesse de navigation réduite et le manque d'infrastructure de soutien, peuvent également limiter l'utilisation du passage du Nord-Ouest comme voie de navigation. D'autres enjeux touchant les transports en particulier se dessineront probablement à mesure que les sites seront aménagés (voir l'étude de cas 4).

ÉTUDE DE CAS 4

MINE DE NICKEL-CUIVRE-COBALT DE VOISEY'S BAY À NUNATSIAVUT

La mine de nickel-cuivre-cobalt de Voisey's Bay, appartenant à l'entreprise Vale qui l'exploite, est située à environ 35 km au sud de la collectivité de Nain sur la côte nord du Labrador. La mine est exploitée dans une région subarctique éloignée et aménagée sur des terres qui font l'objet de revendications territoriales par des Innus et les Inuits de Nunatsiavut. Le principal corps minéralisé de la mine contient du nickel, du cuivre et du cobalt et est reconnu comme étant l'un des plus grands gisements de nickel au monde. La mine expédie le concentré minier vers ses installations de transformation à Long Harbour, à Terre-Neuve, pendant la saison des eaux libres, mais aussi pendant la saison de couverture de glace, entre janvier et mars (Vale, 2013).

Dans le cadre de l'évaluation des incidences environnementales (EIE) de la mine, l'Association des Inuits du Labrador et la Nation innue ont soulevé des préoccupations concernant le transport des cargaisons en zone de banquise côtière et le risque de perturbation des activités des gens qui se déplacent vers d'autres collectivités ou les territoires de chasse en passant sur la glace. Une entente a été conclue entre les parties dans le but d'aider à résoudre les problèmes et l'entreprise s'est engagée à ne pas acheminer ses cargaisons pendant la période de prise de glace automnale ou pendant la saison de chasse aux phoques au début du printemps (avril et mai). De plus, la mine attend que la glace initiale atteigne 20 cm d'épaisseur avant le début du brisage des glaces afin d'éviter toute perturbation des trajets empruntés par la faune et les résidents sur la glace de mer (Bell et al., 2008).

Lorsqu'on a réalisé l'EIE de la mine de Voisey's Bay en 1997, les modèles climatiques utilisés prévoyaient des changements climatiques minimes pendant la durée de vie de 25 ans de la mine. L'énoncé des incidences environnementales reconnaissait que des changements aux conditions de la glace et de la mer pourraient se produire pendant la durée de vie de la mine, mais que ces derniers étaient difficiles à prédire (Bell et al., 2008). Au cours de la dernière décennie, la couverture de glace mondiale a disparu à un rythme qui dépasse largement les projections des modèles climatiques (Stroeve et al., 2012). Même si la réduction de la couverture de glace, le retard dans la prise de la glace et le devancement dans la rupture de la glace peuvent faciliter certaines opérations de transport maritime, cela pourrait avoir un effet négatif sur la mine de Voisey's Bay à l'égard de l'entente avec les collectivités locales visant à assurer l'accès aux routes de glace de mer et les territoires de chasse traditionnels. Si la glace de mer prend plus de temps à se former et à atteindre l'épaisseur requise avant le brisage, en vertu de l'entente conclue avec les Inuits et les Innus, la mine devra peut-être interrompre le transport de produits miniers pendant l'hiver (Pearce et al., 2009).

Vale reconnaît la problématique des changements climatiques et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais la mine de Voisey's Bay n'a établi aucun plan proactif en vue de s'adapter aux éventuels changements climatiques, notamment aux changements dans la dynamique des glaces de mer (CVRD Inco, 2006). Les pratiques de gestion adaptative adoptées par les exploitants de la mine se limitent à des activités de contrôle, d'observation et d'évaluation des risques ayant pour objet de suivre les effets des changements de la glace de mer sur les activités côtières et sociales des collectivités autochtones; ils ne prévoient réagir que lorsque les changements climatiques observés commenceront à avoir un effet mesurable sur les activités de l'entreprise (CVRD Inco, 2006). Cette approche en matière d'adaptation correspond typiquement aux stratégies adoptées par la plupart des sociétés minières au Canada lorsqu'il s'agit de faire face aux changements climatiques et cela a parfois entraîné une charge financière pour les entreprises ou des dommages à l'environnement, ou les deux, tel que décrit ci-dessus. L'enjeu en matière d'adaptation consiste à trouver un juste équilibre entre la cueillette de nouvelles données pour mieux comprendre les effets négatifs probables des changements climatiques et atteindre le meilleur résultat à court terme en fonction de l'état des connaissances actuelles dans ce domaine (Allan et Stankey, 2009).

EXTRACTION ET TRANSFORMATION

Les conditions climatiques se répercutent également sur les activités d'extraction et de transformation de certains minéraux. Les émissions de poussière et les règlements liés à leur contrôle sont particulièrement préoccupants en ce qui concerne les mines de sable, de gravier, de calcaire et de dolomie. Des conditions sèches et chaudes intensifient les épisodes d'émission de poussière et les exploitants miniers doivent mettre en œuvre des mesures de contrôle, comme la vaporisation d'eau et l'entreposage des matières dans des entrepôts couverts. L'augmentation des précipitations associées aux changements climatiques dans certaines régions pourrait être bénéfique pour ces sociétés minières, car cela aiderait à contrôler les émissions de poussière. Par contre, des précipitations trop abondantes peuvent compromettre le séchage des minéraux extraits, ce qui fait appel à une plus grande consommation d'énergie et entraîne des coûts plus élevés (Pearce *et al.*, 2009; voir l'étude cas 5).

ACTIVITÉS QUOTIDIENNES

Les activités quotidiennes des sites miniers sont sensibles aux conditions météorologiques extrêmes, y compris les précipitations

intenses et les fortes chutes de neige, les inondations, les périodes de sécheresse, le changement des conditions des glaces, les températures extrêmement froides et les incendies de forêt, car elles peuvent réduire la capacité opérationnelle (Pearce *et al.*, 2009; TRNEE, 2012a). Les activités minières sont souvent menées dans des régions disposant de services et d'infrastructures d'accès limités, lesquels sont d'ailleurs sensibles aux changements climatiques. Par exemple, en mai 2012, les activités de plusieurs mines d'or près de Timmins, en Ontario, ont été interrompues en raison des incendies de forêt, qui avaient causé des pannes d'électricité, bloqués l'autoroute menant aux mines et menacés les installations minières comme telles (CBC, 2012). Les mines exploitées en terrain montagneux, en Colombie-Britannique, sont vulnérables aux coulées de boue et de débris causées par les précipitations et les routes utilisées pour le transport peuvent être emportées, particulièrement si les fortes précipitations surviennent pendant la période de dégel printanier. Les activités minières des régions centrales du Canada ont été interrompues par le verglas, les inondations, les températures extrêmement froides et les tempêtes. On prévoit que les changements sur le plan de la fréquence et de l'intensité de ces conditions devraient se poursuivre dans l'avenir, ce qui aura un effet sur les activités minières (Pearce *et al.*, 2009).

ÉTUDE DE CAS 5

MINE DE SULFATE DE SODIUM, À CHAPLIN, EN SASKATCHEWAN

Le sulfate de sodium qui est extrait et vendu est destiné à l'utilisation dans la fabrication de détergents à lessive en poudre, de verres et de textiles, dans la féculé de maïs modifiée, dans les désodorisants à tapis, dans la fabrication de pâte kraft et dans les granulés alimentaires riches en minéraux destinés aux animaux d'élevage. Dans des conditions climatiques idéales, les installations de production de sulfate de sodium utilisent la chaleur du soleil pour éliminer l'eau d'une solution de dérivés sodiques par évaporation, jusqu'à ce qu'ils se déposent par précipitation au fond des réservoirs pour ensuite être récupérés. Ce processus nécessite un approvisionnement en eau suffisant au printemps, des étés secs et chauds, pour optimiser la concentration de la solution de saumure, et des hivers froids, pour faciliter la récupération du sulfate de sodium gisant au fond des réservoirs. Dans ces conditions idéales, les intrants en énergie dans le système sont minimes, ce qui permet de réduire les coûts de production et, ainsi, d'augmenter le degré de compétitivité de la mine. La variabilité des conditions climatiques présente de nombreux défis opérationnels. Par exemple, des précipitations estivales trop abondantes contraignent les mines à utiliser des pompes pour éliminer les surplus d'eau, ce qui augmente les coûts de production. Des hivers plus chauds, pendant lesquels la congélation du sol sous les réservoirs est retardée, limitent le recours à la machinerie lourde et augmentent les coûts de récupération du sulfate de sodium.

La mine, appartenant à la Saskatchewan Mining and Minerals Inc. située à Chaplin, en Saskatchewan, est une petite mine de sulfate de sodium. Son succès est lié aux conditions météorologiques de précipitations et de ruissellement favorables, ainsi qu'à son accès au lac Chaplin, un lac salin de 18 km² (figure 5).

Les précipitations locales et le ruissellement printanier sont les deux principales sources d'eau qui alimentent la mine de Chaplin. On a prévu une autre source d'eau pour aider la mine en cas de pénurie. En effet, l'eau peut être détournée de la rivière Wood vers le ruisseau Chaplin, puis vers le lac Chaplin où elle sera puisée par la mine. Ce système de distribution est géré en collaboration avec Canards illimités Canada et profite à la réserve locale de sauvagine. La mine a également installé des réservoirs d'eau qui peuvent servir pendant les années de sécheresse. L'efficacité d'utilisation de l'eau a également augmenté au cours des vingt dernières années grâce à l'érection autour du lac Chaplin de petites digues, dont l'objet est de diviser le lac en plus petites sections et d'augmenter le contrôle qu'ont les exploitants miniers sur le niveau de l'eau, leur permettant ainsi d'optimiser les concentrations de saumure pendant l'extraction. Les sections permettent aux exploitants d'ajouter de l'eau là où cela est nécessaire, ce qui permet d'améliorer l'efficacité d'utilisation de l'eau. En cas de précipitations abondantes, les pompes peuvent servir à éliminer le surplus et contrôler les concentrations de saumure. Ces techniques permettent à la mine d'améliorer ses procédés d'extraction par dissolution et de récupération, malgré les changements et les variations climatiques.



FIGURE 5 : Mine de sulfate de sodium de Chaplin, au sud-ouest de la Saskatchewan (Photo gracieusement fournie par la Saskatchewan Mining and Minerals Inc.).

4.2 ÉTAT DE L'ADAPTATION AU NIVEAU DE L'INDUSTRIE MINIÈRE CANADIENNE

L'attention accordée aux mesures d'adaptation aux changements climatiques – soit la planification à long terme qui tient compte des effets des changements climatiques aussi bien actuels que prévus – varie considérablement au sein du secteur minier. Le manque évident de planification proactive en matière d'adaptation aux changements climatiques dans le secteur minier semble indiquer que certains intervenants considèrent cette mesure comme une préoccupation mineure par rapport aux enjeux immédiats tels que le respect des exigences réglementaires et des besoins en ressources humaines, et la gestion des fluctuations du marché (Ford *et al.*, 2011). Dans certains cas, le fait que les décideurs des sociétés minières aient une compréhension et des connaissances limitées des changements climatiques actuels et prévus peut constituer un frein aux activités de planification en vue de l'adoption de mesures d'adaptation. En outre, les changements climatiques sont parfois perçus comme un événement qui pourrait se produire au-delà de la durée de vie de la mine et ne présentent, par conséquent, qu'une importance immédiate limitée (Ford *et al.*, 2010).

L'évaluation des incidences environnementales est l'un des mécanismes ayant permis de sensibiliser le secteur minier aux effets des changements climatiques et à l'adaptation à mesure que les sociétés passent de l'étape d'exploration avancée à celle de la production. Ces évaluations se fondent souvent sur des scénarios climatiques pour déterminer les effets potentiels sur les infrastructures minières et l'environnement immédiat. Des stratégies de surveillance et d'adaptation sont définies à ce moment. Cependant, on doit reconnaître que la mesure dans laquelle les stratégies des projets miniers sont mises en œuvre et leurs activités modifiées est restreinte (Bell *et al.*, 2008).

Des mesures comme le renforcement ou le remodelage des infrastructures peuvent s'avérer coûteuses et sont parfois jugées inutiles par les exploitants vu la courte durée de vie de plusieurs mines. De plus, l'incertitude liée aux prévisions de changements climatiques est considérée comme un obstacle lorsqu'il s'agit de prendre des décisions en matière d'investissement concernant l'adaptation (Ford *et al.*, 2010). Malgré tout, des progrès ont été réalisés et certains concepteurs ont inclus les paramètres des changements climatiques à leurs plans de conception (Ford *et al.*, 2011). La planification proactive en matière d'adaptation est toutefois mise en œuvre dans quelques sites d'exploitation minière, principalement dans le nord du pays (Ford *et al.*, 2011).

Bon nombre de facteurs influencent la capacité d'un site minier à s'adapter aux changements climatiques. On compte parmi

ces facteurs les données sur les changements climatiques, la réglementation et l'accès à des solutions de nature technique.

Données sur les changements climatiques – Les décideurs responsables de la conception, de la construction, de l'entretien et du déclassement des infrastructures minières doivent mieux comprendre les effets probables des changements climatiques sur les sites miniers et la façon dont les techniques d'ingénierie peuvent servir à gérer ces changements. On craint que les scénarios climatiques actuels ne soient pas suffisamment précis pour appuyer la prise de décisions. Parmi les besoins exprimés, il faut veiller à ce que les données sur le climat soient présentées dans un format pouvant servir immédiatement aux promoteurs et exploitants des mines; il faut également fournir une orientation susceptible d'aider à l'interprétation d'un vaste éventail de scénarios sur les changements climatiques et à leur intégration aux plans d'infrastructure et de fermeture (Ford *et al.*, 2011).

Réglementation – La planification en matière d'adaptation dans le secteur minier semble être en grande partie facultative. Malgré l'attention récemment accordée aux changements climatiques dans le cadre du processus d'évaluation environnementale établi pour de nombreux projets d'aménagement minier, il n'existe aucune exigence générale qui oblige les promoteurs à tenir compte des changements climatiques dans leurs plans d'aménagement ou dans leurs plans de fermeture. La réglementation, élaborée de concert avec les promoteurs, pourrait servir à s'assurer que les connaissances disponibles relatives aux changements climatiques actuels et futurs sont intégrées au processus de planification de la mine (TRNEE, 2012a).

Solutions de nature technique – Dans bien des cas, les technologies et les stratégies d'ingénierie requises pour adapter les activités minières en fonction des changements climatiques existent déjà. Par exemple, les sites qui doivent maintenir la continuité du gel emploient couramment le thermosiphon (Pearce *et al.*, 2011). De la même façon, il est possible de modifier la couverture des résidus miniers, afin de s'assurer que les matières enfouies sous terre demeurent congelées, et de construire le réseau de transport terrestre de manière à perturber le moins possible les couches sous-jacentes de sol gelé. Dans d'autres cas, les bassins de confinement, les bermes et les autres infrastructures de retenue peuvent être solidifiés de manière à résister aux épisodes de précipitations extrêmes plus fréquents qui surviendront au cours de la durée de vie de la mine et au-delà. Il existe des solutions de nature technique susceptibles d'atténuer les effets négatifs des changements climatiques sur les activités minières, cependant elles sont rarement rentables et, jusqu'à présent, il y a peu de mesures incitatives, aussi bien financières que réglementaires, encourageant leur adoption.

5. ÉNERGIE

Le Canada dispose de ressources énergétiques abondantes et variées qui font partie intégrante de son économie. Il détient la troisième réserve de pétrole brut et la quatrième réserve d'uranium en importance dans le monde, et il est le deuxième plus grand producteur d'uranium au monde. En outre, le Canada est le troisième plus grand producteur d'hydroélectricité, le cinquième plus grand producteur de pétrole et de gaz naturel, et le deuxième plus grand exportateur net d'uranium (Ressources naturelles Canada, 2013b). En

2012, le secteur de l'énergie a contribué pour environ 155 milliards de dollars, soit 9 %, au PIB du Canada. Cette même année, les exportations énergétiques, dont 90 % ont été envoyées aux États-Unis, représentaient à elles seules plus de 27 % des exportations totales du Canada (Ressources naturelles Canada, 2013b). La production d'énergie primaire du Canada est dominée par le pétrole brut et le gaz naturel (figure 6). L'Alberta est de loin le plus gros producteur d'énergie primaire au Canada (figure 7).

De nombreux éléments de l'offre, du transport et de la demande d'énergie sont vulnérables aux changements climatiques et seront touchés par divers aspects de ces changements, notamment la hausse des températures, les changements de la fréquence et de l'intensité des phénomènes extrêmes et les changements qui ont une incidence sur la disponibilité de l'eau (figure 8). Cependant, à l'exception du sous-secteur de l'hydroélectricité, l'adaptation aux changements climatiques dans le secteur de l'énergie a fait l'objet d'une attention bien moindre de la part de l'industrie et des chercheurs que les questions portant sur les mesures d'atténuation des gaz à effet de serre (Wilbanks *et al.*, 2007; ICF Marbek, 2012).

5.1 DEMANDE D'ÉNERGIE

Les changements relatifs à la population, à l'activité économique, aux prix de l'énergie et à l'efficacité énergétique sont ceux qui influent principalement sur les tendances à long terme de la demande d'énergie (AIE, 2011a; Ressources naturelles Canada, 2011b). Au Canada et ailleurs dans le monde, les changements climatiques entraîneront une diminution de la consommation d'énergie pour le chauffage en hiver et une augmentation de la demande pour la climatisation en été (lorsque les autres facteurs demeurent constants, p. ex., Zmeureanu et Renaud, 2008; Isaac et van Vuuren, 2009; Schaeffer *et al.*, 2012). Le résultat annuel net associé à la modification de la demande d'énergie causée par les changements climatiques sera propre à chaque pays et à chaque région (Schaeffer *et al.*, 2012).

La demande réduite en chauffage aura principalement un effet sur les combustibles, comme le gaz naturel et le mazout de chauffage, tandis que la demande accrue en climatisation augmentera la consommation d'électricité, soit la principale source d'énergie pour refroidir une pièce (Wilbanks *et al.*, 2007). Ces effets se feront principalement sentir dans les secteurs résidentiels et commerciaux (Mideksa et Kallbekken, 2010). La capacité de répondre à une charge de pointe plus élevée durant la période estivale, associée à la modification de la demande d'énergie causée par les changements climatiques, représente un défi considérable pour le secteur de l'énergie (ICF Marbek, 2012) et pourrait exiger des investissements importants dans de nouvelles capacités de production (Mills, 2007).

L'Ontario est la seule province où la charge de pointe annuelle actuelle survient en été (NERC, 2012). Alors que de récentes études continuent de démontrer que la demande en électricité en Ontario est vulnérable à la variabilité et aux changements de nature climatique et qu'on observe une tendance indiquant une hausse du nombre de jours de canicule dans plusieurs villes (voir le chapitre 7 – *Santé humaine*), l'ampleur des effets sur la demande en énergie peut ne pas être élevée (p. ex., Lin *et al.*, 2011). En outre, la charge de pointe dans cette province a considérablement diminué après avoir atteint des niveaux records entre 2004 et 2006 (IESO, 2009), ce qui semble indiquer que l'Ontario est peut-être moins vulnérable à ce type de changement que l'on ne le croyait auparavant. Même si l'on juge que le réseau électrique de l'Ontario dispose d'une marge de réserve suffisante pour demeurer fiable en cas de problèmes inattendus, y compris les phénomènes météorologiques extrêmes (NERC, 2012), le Commissaire à l'environnement de l'Ontario (2012) a demandé que l'on mène une évaluation approfondie à ce sujet afin de s'assurer de la fiabilité du réseau, malgré les changements climatiques.

L'influence potentielle des changements climatiques sur le commerce de l'électricité entre le Canada et les États-Unis est reconnue (p. ex.,

Scott et Huang, 2007; Hamlet *et al.*, 2009; Ouranos, 2010), mais il n'existe aucune analyse quantitative à ce sujet. On prévoit que la demande d'électricité en période estivale augmente aux États-Unis en raison des changements climatiques, mais il reste à déterminer si les entreprises canadiennes de services publics seront en mesure de saisir cette occasion d'exporter puisqu'elles feront également face à une demande intérieure plus élevée pendant l'été (Scott et Huang, 2007).

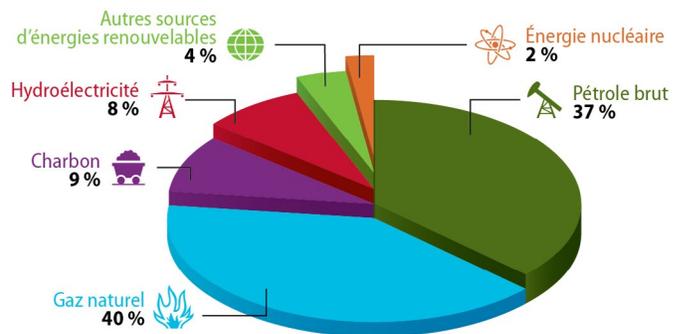


FIGURE 6 : Production d'énergie primaire au Canada. Tous les chiffres renvoient à la production de 2010 (source : Ressources naturelles Canada, 2012e).

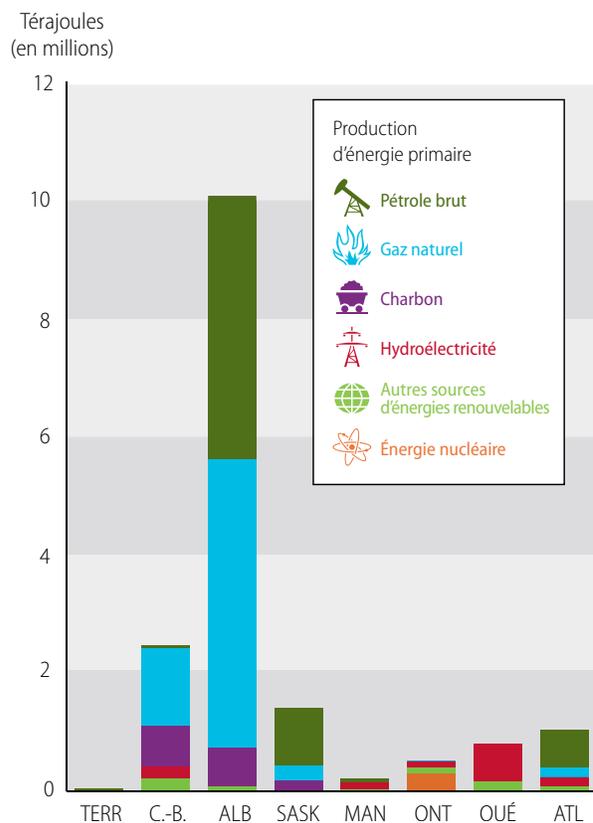


FIGURE 7 : Production d'énergie primaire par province (il convient de remarquer que les chiffres pour les Territoires du Nord-Ouest ont été combinés, tout comme ceux des quatre provinces de l'Atlantique; données fournies par Ressources naturelles Canada, 2012e)

ENCADRÉ 2

PRINCIPALES DÉFINITIONS DE LA TERMINOLOGIE DE L'ÉNERGIE

Secteur de l'énergie – industries qui participent à la production, la transformation et le transport d'énergie (Ressources naturelles Canada, 2012e).

Source d'énergie – toute substance qui produit de la chaleur ou de la puissance (*extrait modifié tiré de Ressources naturelles Canada, 2011b*).

Énergie renouvelable – énergie tirée de ressources naturelles pouvant être naturellement reconstituées ou renouvelées au cours de la durée de vie d'un être humain (Ressources naturelles Canada, 2012f).

Énergie non renouvelable – énergie produite à partir de ressources limitées qui finiront par s'appauvrir ou dont l'extraction se fera plus coûteuse ou difficile. Ces ressources comprennent le pétrole brut et des produits pétroliers, le gaz naturel, le charbon et l'uranium (*extrait modifié tiré de Ressources naturelles Canada, 2012g*).

Énergie primaire – énergie qui n'a pas encore été transformée (*extrait modifié tiré de OCDE, 2012*).

Énergie secondaire – énergie produite par la conversion d'énergies primaires, par exemple l'électricité produite à partir du gaz, de l'énergie nucléaire, du charbon ou du pétrole, le mazout et l'essence produits à partir de l'huile minérale.

Production d'énergie primaire – énergie primaire produite dans un pays, y compris celle qui sera exportée (*extrait modifié tiré de Ressources naturelles Canada, 2011b*).

Charge de pointe – charge maximale consommée ou produite par une unité ou un groupe d'unités durant une période donnée (quotidienne, mensuelle ou annuelle). Étant donné que l'électricité ne peut habituellement pas être stockée, une certaine capacité de production doit être en place pour répondre à la demande en période de pointe (*extrait modifié tiré de ONE, 2004*).

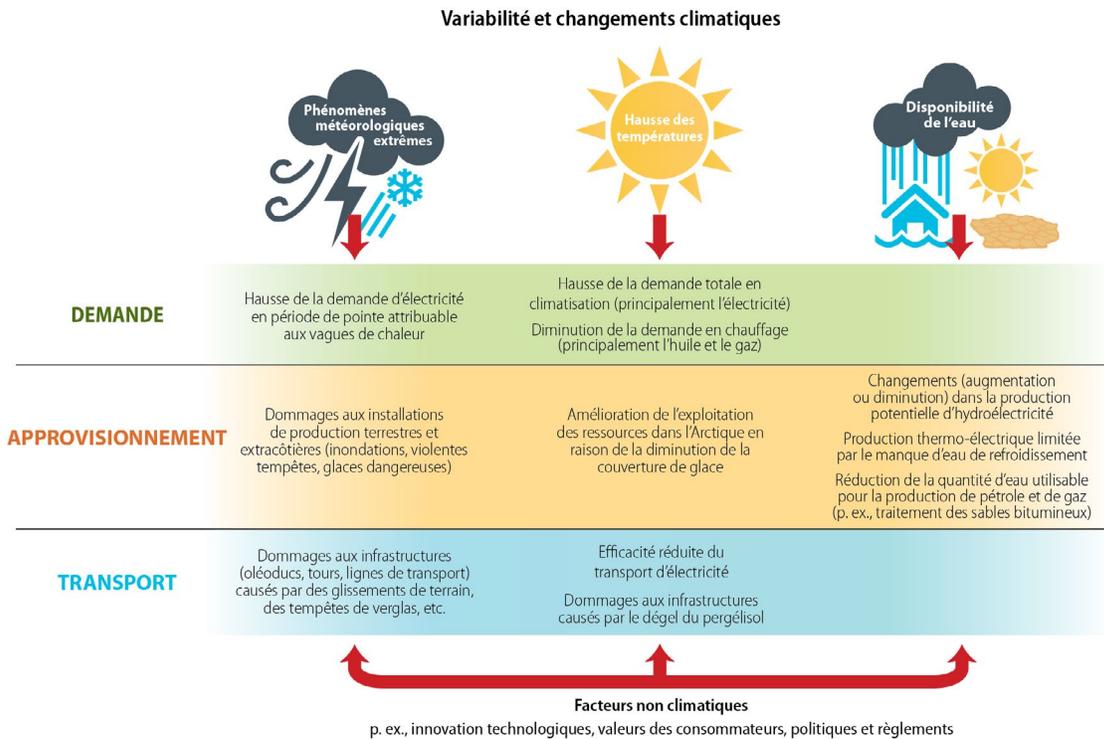


FIGURE 8 : Principaux effets des changements climatiques sur le secteur de l'énergie, en tenant compte de l'importance des facteurs de nature non climatique dans le choix des mesures en matière d'adaptation.

ADAPTATION

Les mesures visant à réduire la consommation d'électricité future comprennent des programmes et des normes, qui favorisent l'efficacité énergétique dans les immeubles, les appareils et l'équipement (Geller *et al.*, 2006), et des pratiques de conservation de l'énergie tels les dispositifs d'ombrage contrôlés par l'utilisateur, l'amélioration de la ventilation naturelle ou l'endurance d'une température plus élevée à l'intérieur pendant l'été (Levine *et al.*, 2007; Gupta et Gregg, 2012). Des augmentations prévues de l'utilisation des appareils de climatisation et de leur pénétration sur le marché en raison des changements climatiques semblent indiquer qu'il serait particulièrement profitable d'en améliorer leur efficacité (Scott *et al.*, 2008). Le concept de réseau intelligent, dont l'objet consiste à accroître la coordination des réseaux électriques afin de répondre aux changements de l'offre et de la demande, peut également représenter une mesure d'adaptation importante, puisqu'elle maximise la fiabilité et la stabilité du réseau (Newsham *et al.*, 2011; Lilley *et al.*, 2012). La mise en place d'un réseau intelligent à grande échelle offre la possibilité de maintenir la charge de pointe actuelle en Amérique du Nord jusqu'en 2050 (AIE, 2011b). Des mesures d'aménagement urbain qui atténuent les effets des îlots thermiques peuvent également aider à réduire la demande en climatisation (Smith et Levermore, 2008; Xu *et al.*, 2012). Toutes ces mesures offrent des avantages sur le plan de l'adaptation et certaines peuvent contribuer à atteindre d'autres objectifs stratégiques tels que la compétitivité économique, la sécurité en matière d'énergie, la santé et le bien-être, ou être déclenchées par ces facteurs (p. ex., Levine *et al.*, 2007; Sathaye *et al.*, 2007; Ürge-Vorsatz et Tirado Herrero, 2012).

5.2 SOURCES D'ÉNERGIE

L'approvisionnement du Canada en énergie provient de sources renouvelables et non renouvelables. La plupart des sources d'énergie renouvelable (p. ex., hydroélectricité, énergie éolienne et solaire, et biomasse) sont intrinsèquement sensibles aux variations et aux changements de nature climatique, tandis que les sources d'énergie non renouvelables (p. ex., pétrole, gaz naturel, uranium et charbon)

sont, de par leur nature, moins vulnérables. Or, les changements climatiques ont un effet sur l'approvisionnement en énergie dérivée de toutes les sources lorsqu'on considère l'ensemble du processus, des étapes de l'exploration à celles de la mise en valeur et de la distribution. Augmenter la diversité des sources d'énergie, en utilisant différentes sources d'énergie renouvelable et non renouvelable et de nombreuses sources du même type d'énergie, peut améliorer la résistance de l'approvisionnement énergétique.

5.2.1 ÉNERGIE RENOUVELABLE

Les sources d'énergie renouvelables fournissent environ 12 % de l'approvisionnement total en énergie primaire au Canada, l'hydroélectricité étant de loin la source d'énergie renouvelable la plus importante (Ressources naturelles Canada, 2012e).

HYDROÉLECTRICITÉ

À l'heure actuelle, l'hydroélectricité représente 59 % de la production d'électricité au Canada (Statistique Canada, 2013). Plus de 90 % de la production totale d'électricité au Québec, en Colombie-Britannique, au Manitoba et à Terre-Neuve-et-Labrador provient des centrales hydroélectriques. L'Ontario, l'Alberta et le Nouveau-Brunswick produisent aussi d'importantes quantités d'hydroélectricité, alors que le Yukon et les Territoires du Nord-Ouest en dépendent pour répondre à la demande locale. La majeure partie de l'hydroélectricité produite au Canada provient de grandes centrales à réservoir (figure 9), alors que la capacité supplémentaire est fournie par de petites centrales au fil de l'eau. Les marchés transfrontaliers de l'électricité, tant interprovinciaux qu'internationaux (États-Unis) sont vastes. La disponibilité de sources abondantes d'énergie hydroélectrique permet au Canada d'appuyer les industries énergivores, comme les alumineries (voir l'étude de cas 6).

À ce jour, la plupart des recherches canadiennes portant sur les changements climatiques et l'hydroélectricité ont porté sur les conséquences hydrologiques des changements climatiques telle

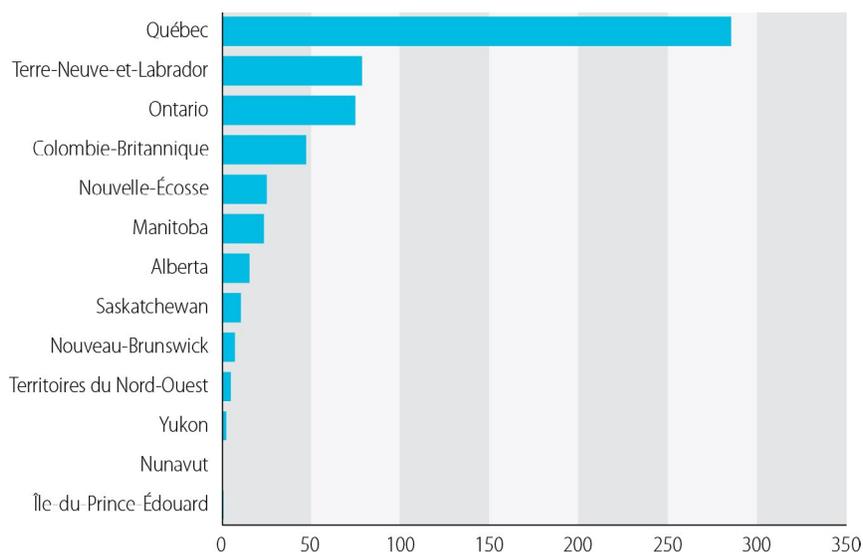


FIGURE 9 : Grands barrages (supérieurs à 15 m) conçus pour alimenter les réservoirs hydroélectriques au Canada (source : Global Forest Watch, 2012).

la modification de la périodicité et de l'ampleur des débits d'eau. Les projections climatiques et les modèles hydrologiques indiquent une diminution probable des débits d'été, une augmentation des débits d'hiver, une diminution des niveaux de l'eau au printemps et un changement de la périodicité des débits de pointe dans la plupart des bassins hydrographiques au Canada, causés en grande partie par une augmentation de la fréquence des pluies hivernales et une réduction de la quantité de neige (p. ex., Fortin *et al.*, 2007; Boyer *et al.*, 2010; Rodenhuis *et al.*, 2011; Kienzle *et al.*, 2012). L'ampleur des changements prévus varie considérablement d'une région à l'autre, de même qu'au sein d'un bassin hydrographique. Dans certaines régions, comme dans le nord du Québec, l'augmentation du ruissellement annuel moyen (figure 10) pourrait présenter des avantages aux centrales de production hydroélectrique établies. Cependant, une plus grande variabilité hydrologique associée aux changements climatiques augmentera probablement le risque de débordements (débit non productif), surtout en hiver et au printemps pendant la fonte des neiges, dont les incidences les plus importantes se feront sentir au niveau des centrales au fil de l'eau (p. ex., Minville *et al.*, 2010b).

D'importantes différences se produiront dans les bassins hydrographiques où l'on produit de grandes quantités d'électricité (voir le tableau 4). Même dans les scénarios où l'on projette une augmentation des précipitations moyennes annuelles, une hausse de l'évaporation et de l'évapotranspiration peut contribuer à réduire les niveaux d'eau et nuire à la production d'hydroélectricité (p. ex., Buttle *et al.*, 2004). Une augmentation des pluies hivernales pourrait être source de problèmes dans les bassins dont la capacité de stockage du réservoir est limitée (p. ex., Fortin *et al.*, 2007; Shrestha *et al.*, 2012). Dans les rivières alimentées par les glaciers, des changements au niveau du régime d'écoulement auront une incidence sur les débits à la fin de l'été et à l'automne. Par exemple, l'étendue du glacier dans le bassin du fleuve Columbia, en Colombie-Britannique, devrait être réduite de 40 % d'ici 2060 (Jost *et al.*, 2012). Dans le nord du Canada, l'intégration des modèles sur le pergélisol et des modèles hydrologiques s'impose si l'on veut accroître le niveau de compréhension au sujet des répercussions possibles sur la production d'hydroélectricité dans cette région (Goulding, 2011).

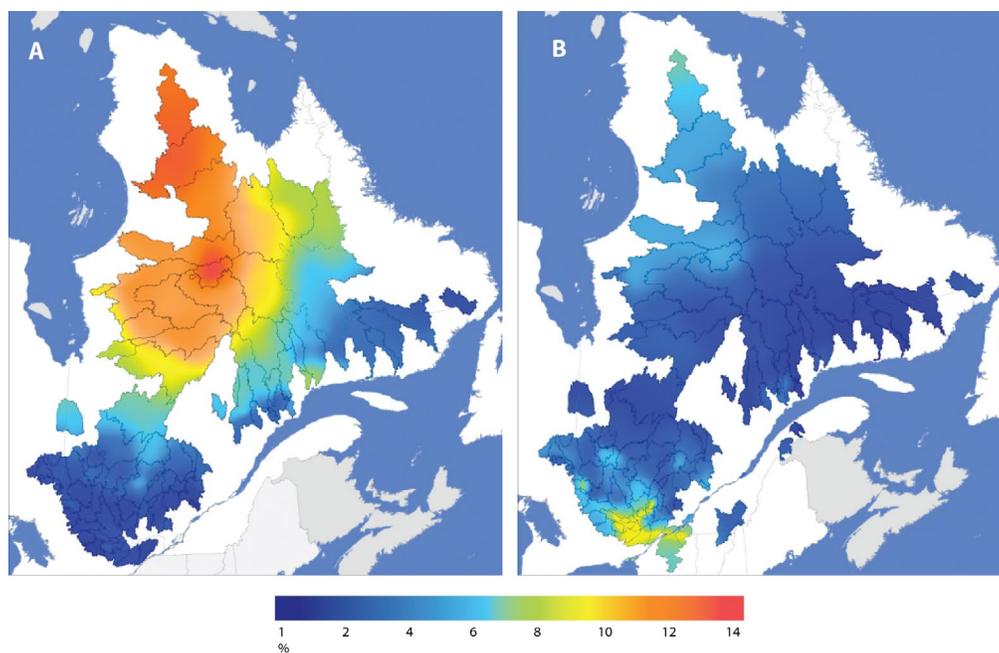


FIGURE 10 : Ruissellement annuel dans les bassins hydrologiques du Québec: **a)** augmentation moyenne entre 2040 et 2070 comparativement au taux de ruissellement enregistré entre 1961 et 1990; **b)** écart-type pour le changement au niveau du ruissellement. L'augmentation moyenne est statistiquement significative lorsqu'elle dépasse les incertitudes liées aux projections, représentées par l'écart-type (*tiré de Desrochers et al.*, 2009)

Province	Bassin fluvial	Importance	Méthode – observations / modèles/ hypothèses	Tendances climatiques et projections	Principales références
Colombie-Britannique	Cours supérieur du fleuve Columbia	<ul style="list-style-type: none"> 12 centrales hydroélectriques Les barrages de Mica et de Revelstoke produisent 25 % des besoins de la C.-B. en hydroélectricité 	<ul style="list-style-type: none"> Période de référence 1961–1990 Période ultérieure 2041–2070 Scénarios : A1B, A2, B1 8 modèles climatiques mondiaux 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation générale du débit sauf à la fin de l'été et à l'automne Débit de pointe un mois plus tôt (en juin plutôt qu'en juillet) 	Zweirs <i>et al.</i> , (2011); Shrestha <i>et al.</i> , (2011)
Colombie-Britannique	Cours supérieur de la rivière de la Paix	<ul style="list-style-type: none"> 2 centrales La centrale G.M. Shrum (barrage W.A.C. Bennett) et le barrage de Peace Canyon produisent 29 % des besoins de la C.-B. en hydroélectricité 		<ul style="list-style-type: none"> Jusqu'à 12 % d'augmentation du débit annuel, plus forte hausse en hiver Diminution des débits à la fin de l'été et à l'automne Les inondations printanières ne surviennent pas beaucoup plus tôt 	Zweirs <i>et al.</i> , (2011); Shrestha <i>et al.</i> , (2011)
Colombie-Britannique	Fleuve Fraser	<ul style="list-style-type: none"> 63 % de la population de la C.-B. vivent à proximité Deux tributaires importants pour la production d'hydroélectricité, plusieurs centrales plus petites 		<ul style="list-style-type: none"> Augmentation du débit annuel total Diminution du débit annuel maximum Inondations printanières qui surviennent plus tôt 	Shrestha <i>et al.</i> , (2012)
Colombie-Britannique	Rivière Campbell	<ul style="list-style-type: none"> Barrage Strathcona – plus grande centrale de l'île de Vancouver 		<ul style="list-style-type: none"> Débit moyen constant Augmentation du débit hivernal, réduction des débits au printemps et à l'été 	Zweirs <i>et al.</i> , (2011)
Alberta	Rivière Cline	<ul style="list-style-type: none"> Tributaire qui fournit 40 % du débit de la rivière Saskatchewan nord En amont du barrage Bighorn, TransAlta est la centrale hydroélectrique la plus productive 	<ul style="list-style-type: none"> Période de référence 1961–1990 Périodes ultérieures 2010–2039, 2040–2069 et 2070–2099 Scénarios : A1B, A2, B1 5 modèles climatiques mondiaux 	<ul style="list-style-type: none"> Diminution des débits annuels – 25 % d'ici 2020, 30 % d'ici 2080 Les débits de pointe surviendront un mois plus tôt d'ici 2050 	Kienzle <i>et al.</i> , (2012)
Manitoba	Winnipeg	<ul style="list-style-type: none"> Influence directement ou indirectement la production de 4600 MW 	<ul style="list-style-type: none"> Période d'observation de l'écoulement fluvial 1924–2003 9 stations de jaugeage 	<ul style="list-style-type: none"> Tendance historique (80 ans) d'augmentation des débits à l'été et à l'automne 	St. George (2007)
Ontario	Nipigon, Abitibi, Matagami	<ul style="list-style-type: none"> Considérés comme étant des bassins prioritaires par la Ontario Power Generation 	<ul style="list-style-type: none"> Période de référence 1961–1990 Période ultérieure 2041–2070 24 modèles climatiques régionaux. 4 modèles climatiques mondiaux Scénarios A2 et A1B 	<ul style="list-style-type: none"> Diminution du débit à l'été (de juin à octobre) et augmentation du débit en hiver (de décembre à mars) 	Music et Sykes (2011)
Québec	Au nord du 49 ^e parallèle	<ul style="list-style-type: none"> La plupart des grandes centrales hydroélectriques de la province se trouvent dans cette région 	<ul style="list-style-type: none"> Période de référence 1961–1990 Période ultérieure 2041–2070 2 modèles climatiques régionaux 14 modèles climatiques mondiaux 	<ul style="list-style-type: none"> Augmentation statistiquement significative du ruissellement moyen annuel entre 2040 et 2070 (voir la figure 10) 	Desrochers <i>et al.</i> , (2009)

TABLEAU 4 : Conclusions tirées d'études récentes relatives aux effets hydrologiques sur les bassins fluviaux d'importance pour la production hydroélectrique au Canada.

Bien que les conclusions des études résumées dans le tableau 4 montrent qu'il n'y aura aucun changement ou augmentation du débit annuel total, il est néanmoins essentiel d'adapter les activités hydroélectriques aux changements climatiques (voir l'étude de cas 6). Même si une augmentation du débit pourrait s'avérer être bénéfique, cela peut aussi causer des inondations si les réservoirs ne sont pas gérés adéquatement. Plus important encore, les effets climatiques prévus entraînent presque toujours des changements considérables dans la répartition du débit en cours d'année, ce qui constitue un défi pour la plupart des activités de gestion des barrages et des réservoirs les plus récents. Par exemple, les réservoirs sont maintenus au niveau le plus bas pendant l'hiver afin d'entreposer l'eau de fonte au printemps. En raison de l'augmentation des débits d'hiver et du fait que les débits printaniers surviennent plus tôt et sont moins élevés, une nouvelle stratégie pourrait recommander d'entreposer de l'eau pendant tout l'hiver, afin d'atténuer les effets des débits réduits en été.

Les récentes recherches vont au-delà des analyses hydrologiques pour devenir des analyses multicritères qui tiennent compte des aspects économiques, politiques, sociaux et environnementaux, afin d'analyser les mesures d'adaptation potentielles ainsi que les coûts et les avantages connexes (Webster *et al.*, 2008). Dans quelques études publiées récemment (p. ex., Raje et Mujumdar, 2010; Soito et Freitas, 2011; Georgakakos *et al.*, 2012), on examine comment les stratégies d'adaptation mises en place dans l'industrie hydroélectrique peuvent intégrer les perspectives des multiples utilisateurs des ressources en eau et l'évolution des demandes en ressources. La gestion adaptative est un puissant moyen de faire face aux conflits liés à l'eau et peut offrir un rendement plus fiable que les approches de gestion traditionnelle tout en atténuant de manière significative les effets négatifs liés aux changements climatiques (Georgakakos *et al.*, 2012). Cette approche peut comprendre une analyse de risques et la réoptimisation des règlements applicables aux activités du réservoir afin d'être en mesure de tenir compte de la variabilité et de l'incertitude des prévisions relatives aux intrants hydrologiques (Georgakakos *et al.*, 2012; voir l'étude de cas 6).

Les méthodes d'adaptation applicables à la production hydroélectrique peuvent comporter des approches structurelles et non structurelles. Les approches structurelles consistent en des modifications physiques qui sont apportées aux infrastructures et aux biens dans le but d'atténuer leur vulnérabilité aux conditions climatiques, alors que les approches non structurelles (ou souples) comportent des modifications apportées au fonctionnement du système énergétique. On compte parmi les mesures structurelles le renforcement de la capacité des centrales actuelles et la révision des critères de conception de nouvelles centrales. L'augmentation de la capacité actuelle des centrales devrait permettre une réduction des débits non productifs. Cependant, cette approche peut s'avérer coûteuse à mettre en œuvre, voire même impossible sur le plan technique, dans les centrales actuelles qui n'ont pas été conçues en fonction d'une augmentation éventuelle de leur capacité. Les coûts de construction et d'entretien, ainsi que les avantages qui découlent d'une hausse de la production hydroélectrique, doivent être pris en considération au moment où il s'agit d'établir les avantages que peut présenter l'adoption d'approches structurelles (Webster *et al.*, 2008; Beauchamp, 2010).

Le recours aux méthodes de gestion des ressources en vue de s'adapter aux changements hydrologiques, de même que les réformes stratégiques ou réglementaires, constituent des exemples

d'approches non structurelles. Des études en cours révèlent qu'en tenant compte de la variabilité saisonnière des débits et de l'incertitude des projections hydrologiques, on pourrait élaborer des mécanismes de gestion susceptibles d'accroître la production hydroélectrique (Haguma, 2012). Par exemple, Côté *et al.* (2011) ont démontré que l'application de scénarios climatiques variés permettait d'accroître l'efficacité des centrales, comparativement aux méthodes classiques qui se fondent uniquement sur les conditions climatiques actuelles (habituellement recommandées et utilisées pour établir un règlement concernant la gestion des réseaux hydroélectriques). Les mesures d'adaptation non structurelles englobent aussi la protection ou le rétablissement des régulateurs de débit naturel telles les zones humides, dont le rôle consiste à offrir un pouvoir tampon pendant les périodes de faibles débits et de pointe (p. ex., Jones *et al.*, 2012).

AUTRES SOURCES D'ÉNERGIE RENOUVELABLE

Les sources d'énergie renouvelable de remplacement (non hydroélectriques) comptent pour près de 4 % de la production d'énergie primaire du Canada. La source principale provient du bois et des déchets de bois et, dans une moindre mesure, du biogaz, du vent, des gaz dégagés par les résidus urbains et les sites d'enfouissement, des déchets industriels et autres, ainsi que de sources solaires et marémotrices. Peu d'études canadiennes examinent les effets des changements climatiques sur ces sources d'énergie (voir Yao *et al.*, 2012, pour une analyse des effets des changements climatiques projetés sur la production éolienne en Ontario).

Les recherches menées à l'extérieur du Canada se sont plutôt axées sur les effets des phénomènes météorologiques extrêmes, y compris le vent et les précipitations, sur la production d'énergie renouvelable de remplacement (Wilbanks *et al.*, 2007; Ebinger et Vergara, 2011; McColl *et al.*, 2012). Par exemple, s'il advient que la vitesse des vents dépasse les valeurs de conception maximales des turbines, l'équipement risque d'être endommagé ou encore, il faudra peut-être interrompre les activités, ce qui provoquera une baisse au niveau de l'efficacité de la capacité de production (Ebinger et Vergara, 2011; McColl *et al.*, 2012). Une hausse des températures moyennes de l'air au-delà d'un certain seuil a un effet négatif sur le vent (baisse de la densité de l'air) et sur la production d'énergie solaire (diminution de l'efficacité des panneaux; Ebinger et Vergara, 2011), mais l'ampleur de ces effets n'est pas connue. Les changements survenant au niveau de la nébulosité et des régimes éoliens auront également une incidence, négative ou positive selon l'évolution des changements, sur la production d'énergie solaire et éolienne. L'évaluation des répercussions des changements climatiques sur la production d'énergie à partir du vent, du soleil et de la biomasse au Canada exige des recherches complémentaires.

5.2.2 ÉNERGIE NON RENOUVELABLE

PÉTROLE ET GAZ

L'industrie pétrolière et gazière exploite ses installations partout au Canada. Le caractère isolé de la plupart de ses activités, y compris les sites situés en milieu nordique et extracôtier, présente des défis pour la chaîne de valeur du secteur. Les documents d'origine canadienne portant sur les effets des changements climatiques sur ce secteur mettent à la fois l'accent sur les risques qu'ils posent

ÉTUDE DE CAS 6

FAIRE FACE AUX EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES GRÂCE À LA GESTION ADAPTATIVE : PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE SUR LE BASSIN DE LA RIVIÈRE PÉRIBONKA

Dans leurs rapports, Minville *et al.* (2008, 2009, 2010b et 2012) ont entrepris une analyse exhaustive de la production hydroélectrique sur la rivière Péribonka, dans le centre-sud du Québec. Le bassin hydrographique couvre 27 000 km² et le ruissellement est régi par la fonte des neiges; la fonte printanière produit 43 % du volume de ruissellement annuel. Les installations hydroélectriques actuelles comprennent deux réservoirs (lac Manouane et Passes-Dangereuses) qui permettent d'entreposer de l'eau et d'alimenter les centrales hydroélectriques (figure 11). L'électricité ainsi produite sert à combler les besoins des alumineries de la Rio Tinto Alcan.



FIGURE 11 : Bassin hydrographique et système hydrologique de la rivière Péribonka (source : Minville *et al.*, 2010a).

L'analyse des répercussions des changements climatiques sur l'hydrologie du bassin hydrographique de la rivière Péribonka s'est faite à l'aide de prévisions de températures et de précipitations élaborées à partir des données provenant de cinq modèles climatiques mondiaux et de trois scénarios d'émissions réduits à l'échelle du bassin, ainsi que du modèle régional canadien du climat (MRCC; Caya et Laprise, 1999), le but étant de reproduire les régimes hydrologiques en fonction des conditions climatiques actuelles et projetées. Les résultats révèlent une crue printanière hâtive, une augmentation des débits d'hiver et une diminution des débits en été et à l'automne en raison des changements climatiques. Ces changements sont accentués au fil du temps et varient entre les sous-bassins du nord et du sud (figure 12). L'incertitude pesant sur ces prévisions est en grande partie liée aux changements dans la couverture nivale, qui sont effectivement plus importants pendant les inondations hivernales et printanières.

L'analyse prévoyait également l'élaboration de politiques de gestion optimales applicables aux réservoirs du réseau en stimulant et en évaluant son rendement en fonction des conditions climatiques actuelles et projetées. Les résultats de la modélisation indiquent des niveaux d'eau plus élevés au printemps dans le lac Manouane pour toutes les périodes qui ont été comparées à la période de référence (figure 13). On observe aussi une baisse du niveau d'eau estival du lac Manouane d'ici 2070-2099, étant donné la diminution du débit entrant et la nécessité de maintenir le réservoir de Passes-Dangereuses à son niveau le plus élevé afin de maximiser la production hydroélectrique. Le comportement du réservoir de Passes-Dangereuses est semblable à celui du lac Manouane, sauf que le changement en période de décrue est plus marqué dans le réservoir, en raison du fait que les inondations printanières surviennent plus tôt.

Étude de cas 6 suite à la page suivante

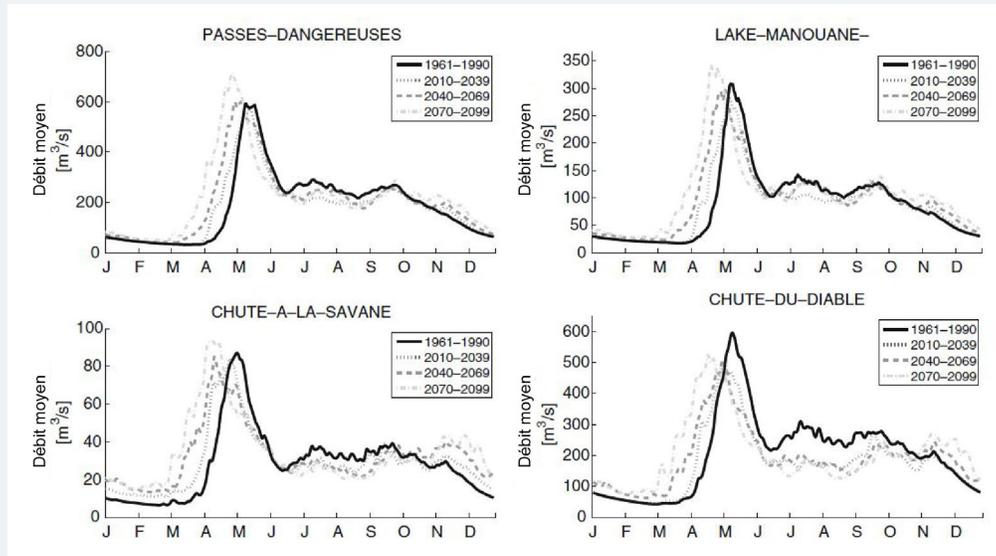


FIGURE 12 : Hydrogrammes annuels moyens des sous-bassins de la rivière Péribonka pour les périodes 2010–2039, 2040–2069 et 2070–2099, comparés aux hydrogrammes de la période de référence 1961–1990, reproduits à l'aide des projections du modèle régional canadien du climat tenant compte des émissions de gaz à effet de serre du scénario SRES A2 (tiré de Minville et al., 2009).

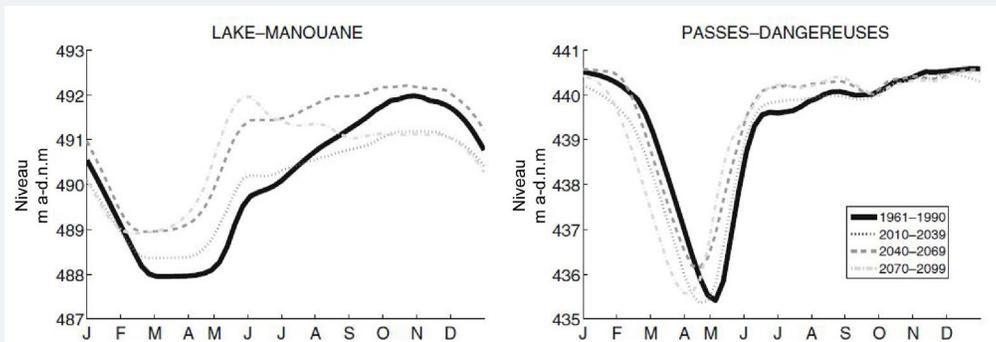


FIGURE 13 : Niveaux du réservoir pendant les périodes 2010–2039, 2040–2069 et 2070–2099, comparés aux niveaux de la période de référence 1961–1990 (tiré de Minville et al., 2009).

Toutes les prévisions climatiques font état d'une éventuelle augmentation du ruissellement annuel, ce qui signifie que la production hydroélectrique devrait augmenter. À la centrale de Chute-des-Passes, cette augmentation pourrait aller de 1 % à 15 % au cours de la période s'étendant de 2040 à 2069, selon le scénario appliqué et en supposant une gestion optimale. Par contre, si les politiques de gestion actuelles ne changent pas, la production hydroélectrique diminuerait de 1 % à 14 %, étant donné l'incapacité à entreposer l'eau produite par la fonte précoce des neiges et l'écoulement non productif qu'elle entraîne. En adoptant des pratiques de gestion adaptative et des approches d'adaptation non structurelles, notamment la mise à jour régulière des politiques de gestion, les producteurs devraient être en mesure de tirer parti des répercussions des changements climatiques sur les régimes hydrologiques.

pour les activités en amont et les possibilités qu'ils représentent pour ces dernières (p. ex., exploration, extraction et production), et mettent particulièrement l'accent sur la situation dans le Nord (p. ex., Furgal et Prowse, 2008). Parmi les risques relevés, on souligne le raccourcissement de la période pendant laquelle il est possible d'accomplir les activités d'exploration qui dépendent du gel du sol et le transport de matériel par routes d'hiver. Les risques à plus long terme des répercussions des changements climatiques sur les projets en milieu nordique sont liés aux conséquences de la dégradation du pergélisol sur la stabilité de l'infrastructure (p. ex., effondrement du sol qui a des conséquences sur les routes d'accès, les immeubles et les oléoducs) et sur la gestion des déchets de forage (qui sont couramment stockés dans le sol gelé en permanence afin de prévenir la mobilisation des contaminants; Furgal et Prowse, 2008). Les risques auxquels les installations de production extracôtières devront faire face sont liés à la hausse de l'activité des tempêtes (y compris les ouragans dans l'océan Atlantique), aux changements au chapitre des risques que présente la glace (icebergs et glace de mer pluriannuelle; p. ex., Stantec Consulting Ltd., 2012) et aux incidences potentielles sur l'environnement et sur la santé humaine que représentent les déversements de pétrole (p. ex., ONE, 2011).

L'industrie pétrolière et gazière a régulièrement recours à des moyens concrets pour aborder la question des risques climatiques, mais ceux-ci sont rarement documentés dans des sources de données disponibles au public. Les preuves, lorsqu'elles sont disponibles, indiquent que, de manière générale, l'industrie croit que le secteur est en bonne position pour s'adapter aux changements climatiques, surtout de manière opportune (TRNEE, 2012a, voir aussi l'étude de cas 7).

Les recherches menées au cours des cinq dernières années démontrent que l'effet des changements climatiques sur les ressources hydriques aura de graves incidences sur le secteur pétrolier et gazier (p. ex., *Projet de recherche sur les politiques*, 2009). Bon nombre d'activités menées en amont et médianes (comme la transformation, la valorisation, le stockage et le transport) associées à la production de pétrole, de gaz et de charbon nécessitent de grandes quantités d'eau et, contrairement à la production de thermoélectricité, elles comprennent presque exclusivement des utilisations liées à la consommation (Ressources naturelles Canada, 2010). Les effets régionaux se feront surtout sentir dans les zones fortement soumises au stress hydrique tel le sud-ouest des Prairies (p. ex., Sauchyn et Kulshreshtha, 2008). Récemment, l'attention a porté sur l'utilisation des ressources hydriques aux fins d'exploitation des sables bitumineux et de fracturation hydraulique.

Même si 75 % à 90 % de l'eau utilisée dans l'exploitation des sables bitumineux est recyclée, le reste est puisé à même les eaux de surface et souterraines. En ce qui a trait aux effets des changements climatiques, l'attention s'est portée sur la capacité de la rivière Athabasca, en Alberta, à fournir de l'eau pour accroître les activités d'exploitation des sables bitumineux, tout en maintenant un débit suffisant en aval pour éviter des répercussions sur l'écosystème. L'analyse de la variabilité des données historiques des débits et des tendances a permis de conclure que des répercussions à court terme sur l'écosystème auraient eu lieu dans des conditions historiques de faible débit et qu'un plan de gestion s'impose afin d'éviter les effets à long terme prévus par les scénarios de changements climatiques (Bruce, 2006; Schindler *et al.*, 2007). Un comité d'experts de la Société royale du Canada (SRC, 2010) a conclu que les inquiétudes au sujet des prélèvements d'eau pendant les périodes à faible débit pourraient être atténuées en aménageant un réservoir hors cours d'eau supplémentaire qui permettrait de stocker l'eau captée pendant les débits de pointe printaniers. Dans son rapport, le comité indique « qu'une diminution substantielle du débit dans la rivière Athabasca découlant des changements climatiques entraînerait fort probablement la mise en œuvre de cette option

(réservoir hors cours d'eau supplémentaire) [traduction] » (SRC, 2010, p. 284). Une analyse détaillée des répercussions des changements climatiques projetées sur les débits de la rivière Athabasca, menée dans le cadre d'une étude sur les prélèvements d'eau réalisée par un comité multilatéral (Ohlson *et al.*, 2010; voir aussi Lebel *et al.*, 2009), a permis de conclure que les incertitudes et les lacunes considérables qui subsistent au niveau de l'état des connaissances à ce sujet, et bien d'autres d'ailleurs, mettaient en lumière l'importance d'adopter des approches de gestion adaptative et variable.

Pour s'adapter aux risques liés à la disponibilité de l'eau, l'industrie des sables bitumineux mise sur les innovations technologiques et souligne les gains importants réalisés en matière d'utilisation efficace de l'eau au cours des dix dernières années (CAPP, 2012). Bien que le réservoir hors cours d'eau demeure une possibilité sur le plan de l'adaptation, des changements fondamentaux apportés aux méthodes employées pour séparer le bitume grâce à des moyens permettant de réduire considérablement la consommation d'eau sont également à l'étude (CAPP, 2012). Du point de vue réglementaire, le Water Management Framework for the Lower Athabasca River (cadre de gestion du cours inférieur de la rivière Athabasca), présenté par le gouvernement de l'Alberta en 2007 pour limiter, contrôler et régler les prélèvements d'eau hebdomadaires dans la rivière, fournit un mécanisme qui protège l'intégrité du milieu dans les conditions climatiques aussi bien actuelles que futures (ESRD, 2013).

PRODUCTION D'ÉNERGIE (À PARTIR DE SOURCES NON RENOUEVABLES)

L'énergie nucléaire représente 15 % et les centrales thermiques alimentées au charbon produisent 13 % de la production d'électricité au Canada (Statistique Canada, 2013). Les effets des changements climatiques les plus préoccupants qui toucheraient la production d'électricité à partir de sources non renouvelables sont liés aux répercussions possibles des phénomènes météorologiques extrêmes sur les infrastructures et à celles sur la disponibilité et la température des eaux de refroidissement (p. ex., Wilbanks *et al.*, 2008; Rübhelke et Vögele, 2011). Même si les données exhaustives sur les installations canadiennes sont publiquement disponibles en consultant les observations des audiences réglementaires, elles n'ont pas été largement diffusées dans les articles scientifiques. La discussion suivante s'appuie en grande partie sur les analyses menées en Europe et aux États-Unis.

La discussion sur les risques liés aux infrastructures des centrales porte surtout sur les tempêtes intenses et les épisodes de précipitations extrêmes, phénomènes pouvant soit causer des inondations ou rendre les routes impraticables, soit entraîner une diminution au niveau de la production, une interruption des activités ou une hausse des coûts associés au drainage et au nettoyage (Wilbanks *et al.*, 2007; Ebinger et Vergara, 2011). Les centrales thermiques et nucléaires font également face à la possibilité d'avoir à réduire leur production ou même d'interrompre complètement leurs activités si les niveaux d'eau atteignent un niveau extrêmement bas (McColl *et al.*, 2012). Une augmentation de la température de l'eau diminue l'efficacité du refroidissement dans les centrales (Harrison *et al.*, 2009), entraînant une hausse proportionnelle de la demande en eau pour les procédés de refroidissement. Les recherches menées en Europe ont permis de documenter l'incapacité de répondre aux besoins des centrales thermiques en matière de refroidissement dans des conditions de températures élevées de l'eau pendant les vagues de chaleur estivale (McColl *et al.*, 2012). En outre, la température des eaux de refroidissement rejetées par les centrales pourrait augmenter, au risque de dépasser les seuils réglementaires établis dans le but de protéger les services écosystémiques. Les infractions aux règlements et à la sécurité

ÉTUDE DE CAS 7

ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DANS LE SECTEUR PÉTROLIER ET GAZIER

Le Carbon Disclosure Project (CDP, soit le projet de divulgation du carbone) est un effort déployé à l'échelle internationale dans le but d'assurer le suivi des progrès des entreprises au niveau de la gestion des risques et des occasions liés aux changements climatiques. Reposant sur les réponses données volontairement à une enquête annuelle ciblant les entreprises les plus importantes en fonction de leur capitalisation boursière, le CDP dispose d'une base de données exhaustive dont les réponses fournies par les entreprises remontent à 2003. Le projet met principalement l'accent sur l'atténuation, mais il pose aussi des questions relatives à l'adaptation. De récents rapports font état d'un changement dans la façon dont les industries canadiennes perçoivent les répercussions matérielles du changement climatique. Par exemple, on note que les occasions sont plus nombreuses que les risques découlant des changements climatiques dans les rapports du CDP sur le Canada parus entre 2008 et 2010 (CDP, 2010). Il est également évident que les secteurs ont une perception très différente en ce qui concerne les risques et les possibilités. De tous les secteurs représentés dans le CDP, les entreprises du secteur de l'énergie étaient probablement les moins susceptibles de signaler les occasions découlant des changements climatiques et se plaçaient au deuxième rang des entreprises les moins susceptibles de déclarer leur exposition aux risques matériels, selon l'analyse des réponses présentées dans les rapports publiés entre 2003 et 2010 (TRNEE, 2012b).

L'enquête de 2010 comprenait des questions sur les risques actuels ou prévus associés aux répercussions matérielles des changements climatiques, la chronologie de ces risques, les conséquences financières possibles et les mesures envisagées ou mises en œuvre pour gérer ces risques. Des exemples de mesures d'adaptation dégagées par les entreprises du pétrole et du gaz canadiennes en vue d'atténuer les risques climatiques actuels et à venir sont présentés dans le tableau 5.

Politique, programmes et normes d'exploitation internes

- Normes d'ingénierie et de construction qui garantissent le fonctionnement des installations dans des conditions extrêmes, y compris les changements liés à la température et au climat
- Processus d'approbation des capitalisations caractérisé par une évaluation de projet qui tient compte des risques techniques, environnementaux et opérationnels; le recensement et le partage des principales découvertes issues des projets d'immobilisations précédents; l'intégration de ces découvertes aux plans de gestion des risques opérationnels
- Programmes encourageant l'intégrité du système et l'entretien préventif continu pour chaque aspect du système gazier
- Plan de continuité des activités et de mesures d'urgence conçus dans le but d'assurer l'approvisionnement continu du carburant de transport
- Programme d'assurance qui couvre aussi bien les dommages matériels que l'interruption des activités et la responsabilité envers les tiers, et qui sert également à gérer les risques commerciaux découlant des dangers liés aux changements climatiques

Mesures pour renforcer la résilience

- Conception et utilisation d'assises en bois, afin que les producteurs puissent forer en saison chaude dans les fondrières de mousse et les zones humides tout en minimisant les perturbations sur le plan environnemental
- Interconnexion du système permettant de rediriger le gaz d'une usine à l'autre en cas de panne, minimisant du coup les pertes de revenus pour l'entreprise et la perte de production pour les consommateurs
- Amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans la conception et l'exploitation des installations existantes et nouvelles, notamment la réutilisation et le recyclage accru de l'eau, la réévaluation des allocations de permis d'exploitation en eau douce qui rapportent à l'État et une collaboration avec l'industrie ayant pour objet de réduire les répercussions au niveau des ressources hydriques locales

Participation des intervenants

- Stratégie de l'eau qui nécessite que les acteurs s'investissent dans l'élaboration des politiques et des règlements et qu'ils collaborent avec les intervenants en ce qui touche les questions hydrologiques particulières à un site comme moyen d'atténuer les effets possibles des changements climatiques

TABLEAU 5 : Exemples choisis de mesures adoptées en vue de gérer les effets matériels des changements climatiques dégagées par les entreprises du pétrole et du gaz canadiennes dans leurs réponses au questionnaire de 2010 du Carbon Disclosure Project (*source : CDP, 2010*).

Le nombre limité de participants à l'enquête du CDP empêche toute généralisation à l'échelle du secteur, mais chaque réponse peut fournir des éclaircissements au sujet de la perception des entreprises du pétrole et du gaz par rapport aux risques et à l'urgence de s'adapter. Par exemple, dans sa réponse à l'enquête du CDP de 2012, la société Encana a cité les risques relatifs à la disponibilité de l'eau liés aux changements des précipitations et aux périodes de sécheresse, ainsi que les effets des phénomènes météorologiques extrêmes sur les activités d'exploration et de production. L'entreprise a jugé que les risques étaient difficiles à quantifier, que la chronologie et l'ampleur des effets n'étaient pas connues, et que la probabilité d'avoir à tenir compte de ces effets était peu vraisemblable. Dans les observations complémentaires, l'entreprise souligne qu'elle poursuit ses activités dans des milieux extrêmes variés en Amérique du Nord, que ses installations sont conçues et bâties de façon à pouvoir fonctionner dans diverses conditions météorologiques et qu'elle procède à un processus de rétrospective et d'apprentissage annuel qui lui permet de communiquer les mesures prises en vue d'atténuer les effets négatifs sur un site à l'ensemble des installations. En ce qui a trait aux risques liés à la disponibilité de l'eau, l'entreprise est d'avis que, du moment que ceux-ci sont gérés, ils auraient un effet négligeable sur les activités d'exploration et de production.

pourraient entraîner l'interruption des activités. Il se peut que de tels risques ne s'appliquent pas au Canada où les centrales nucléaires actuelles sont refroidies par de très grandes masses d'eau (lac Huron, lac Ontario, océan Atlantique). De toute façon, cela ne change en rien le fait que les répercussions des changements climatiques sont un facteur dont il faut tenir compte lorsqu'il s'agit d'identifier l'emplacement de futures centrales.

Les mesures mises en œuvre dans le but de s'adapter à la hausse des températures de l'eau dépendront en grande partie de la technologie de refroidissement actuellement déployée. Le système à eau de refroidissement non recyclée est le type de système le plus courant au Canada (Ressources naturelles Canada, 2010) et comporte une fonction de prélèvement et de rejet continu d'eau de refroidissement. Le déplacement de la prise d'eau vers une partie plus profonde (et plus froide) du lac compte parmi les options qui permettraient de diminuer la quantité d'eau utilisée dans les systèmes à eau de refroidissement non recyclée des installations riveraines. Lorsque les installations sont érigées sur des lacs peu profonds, comme c'est le cas dans la région des Prairies, les options pour faire face aux changements climatiques et aux périodes de sécheresse sont moins nombreuses. De nouvelles technologies servant à réduire la consommation d'eau, améliorer la réutilisation de l'eau et élaborer de nouvelles techniques de refroidissement à sec sont autant de possibilités novatrices qui seront en partie régies par la nécessité de s'adapter aux effets des changements climatiques (ICF Marbek, 2012).

5.3 TRANSPORT DE L'ÉNERGIE

L'infrastructure du transport de l'énergie représente un investissement important, durable et vulnérable aux conditions climatiques pour le

secteur de l'électricité et le secteur pétrolier et gazier. Le réseau de transport de l'électricité couvre 140 000 km au Canada, et près de 60 % du total national est exploité au Québec, en Ontario et en Alberta. L'infrastructure fournit des interconnexions entre les marchés de l'énergie des autres provinces et aux États-Unis (ICF Marbek, 2012). Au total, plus de 825 000 km d'oléoducs de livraison et de transport achemine le pétrole brut, le gaz naturel et les produits pétroliers au Canada (CEPA, 2012). De grands projets de construction d'oléoducs ont été proposés en vue d'améliorer l'accès aux marchés canadiens et américains et de prendre de l'expansion sur les marchés asiatiques. Le réseau de distribution du pétrole, du gaz et du charbon comprend aussi le transport routier, ferroviaire, par barge et par navire-citerne.

Les conditions météorologiques violentes sont la principale cause d'interruption dans l'approvisionnement en électricité. La tempête de verglas qui a frappé l'est du Canada en 1998, dont le coût des dommages avait été estimé à plus de 5 milliards de dollars, fournit un exemple extrême de la vulnérabilité de l'infrastructure de transport de l'électricité. Les températures extrêmes peuvent avoir une incidence sur le rendement d'une grande partie de l'infrastructure, y compris le transport d'électricité (efficacité réduite et affaissement accru des câbles), les oléoducs (efficacité réduite des compresseurs et des ventilateurs de refroidissement) et les chemins de fer (déformation par la chaleur) qui jouent un rôle de premier plan dans le transport du charbon (ICF Marbek, 2012). Les dangers naturels liés au climat présentent également des risques pour le transport de l'énergie. Par exemple, les pluies diluviennes peuvent causer des inondations et des glissements de terrain pouvant interrompre le transport routier et ferroviaire. Le dégel du pergélisol peut provoquer l'affaissement en surface et la déstabilisation des pentes, et ainsi causer une déformation ou la rupture des oléoducs. Des solutions techniques existent pour atténuer la plupart des risques décrits ci-dessus.

6. SYNTHÈSE

Le secteur des ressources naturelles gère systématiquement les risques climatiques. S'adapter à la réalité des changements climatiques sert l'intérêt des entreprises du secteur des ressources naturelles et des collectivités au sein desquelles elles sont exploitées. À l'instar d'autres secteurs, le gouvernement, l'industrie et les organisations non gouvernementales ont tous un rôle à jouer en vue d'assurer l'adaptation dans le secteur des ressources naturelles. Étant donné que les administrations provinciales exercent un pouvoir législatif sur les ressources naturelles relevant de leurs compétences (BCP, 2010), diverses approches et divers niveaux d'activités sont mis en œuvre à l'échelle du pays. Les processus intergouvernementaux offrent un mécanisme grâce auquel il est possible de partager les expériences, les outils et la mise au point des pratiques exemplaires en matière d'adaptation telles que le démontrent les récentes activités du Conseil canadien des ministres des forêts (CCMF, 2013a–d). Le gouvernement fédéral est responsable des questions pangouvernementales, y compris le commerce international, et joue un rôle important dans la recherche et le développement. Les associations industrielles participent de plus en plus à des activités de sensibilisation aux effets des changements climatiques et à la valeur de l'adaptation. Dans les cas où l'on observe un lien étroit entre la variabilité et les changements de nature climatique et la production de ressources, comme c'est le cas dans le secteur de l'hydroélectricité, il existe de nombreux exemples où l'industrie joue

un rôle de premier plan dans l'analyse des effets et le financement de recherches connexes.

Les répercussions biophysiques de premier ordre des changements climatiques sur les activités d'exploration des ressources, l'infrastructure matérielle et les réseaux de transports – y compris les effets liés aux phénomènes météorologiques extrêmes, les changements hydrologiques régionaux, la dégradation du pergélisol, l'élévation du niveau de la mer et autres – sont assez bien comprises en ce qui touche de nombreux aspects liés aux ressources naturelles et n'ont pas évolué de manière significative au cours des cinq dernières années. Les connaissances ont surtout été mises en pratique dans le secteur de la foresterie et dans celui de l'hydroélectricité. D'importantes lacunes persistent au niveau de la recherche sur les impacts biophysiques, y compris les mécanismes qui régissent les changements s'opérant au niveau du régime des vents et de la nébulosité, et les effets possibles de ces changements sur la production d'électricité d'origine éolienne et solaire, les conséquences de la diminution de la disponibilité de l'eau sur les activités pétrolières et gazières et les effets des climats émergents sur les écosystèmes forestiers. Peu d'études exhaustives des répercussions qui s'exercent en aval, y compris l'analyse économique relative au commerce international et à la concurrence sur le marché mondial, ont été réalisées. Cependant, de nouvelles idées ont vu le jour concernant les mesures à prendre pour faire face aux

effets des changements climatiques dans le cadre du processus de planification des activités. Le rapport de Gauthier *et al.* (en cours de révision) présente au secteur forestier quatre grands principes en matière d'adaptation qui peuvent tout aussi bien s'appliquer aux autres secteurs des ressources naturelles. Ces principes sont les suivants:

1. Intégrer efficacement les risques liés aux changements climatiques dans la planification et les activités. Les approches de la gestion du risque exigent l'abandon des cibles de production optimales pour se concentrer plutôt sur l'obtention du meilleur résultat réalisable en fonction d'une gamme de conditions.
2. Intégrer des options dites « sans regret » qui offrent des avantages en fonction d'une gamme d'avenirs potentiels.
3. Adopter un cadre de gestion adaptative. Étant donné l'incertitude liée aux changements climatiques, les mécanismes de gestion doivent démontrer suffisamment de souplesse pour permettre la mise à l'essai d'options alternatives et l'intégration des leçons apprises grâce à ces activités.
4. Assurer un suivi dans le but de cerner les changements liés au climat et les éventuels écarts par rapport aux objectifs de gestion.

De nombreux cadres en matière d'adaptation ont été définis; or, il existe peu d'exemples de leur mise en œuvre ou de documents portant sur les mesures qui ont été adoptées. L'adaptation aux changements en cours dans le secteur des ressources naturelles a essentiellement pris la forme d'interventions ponctuelles et réactives aux phénomènes climatiques. On compte parmi les exemples de telles interventions, le transport par avion de matériel jusqu'aux mines exploitées en milieu nordique lors du raccourcissement de la saison des routes de glace causé par une hausse des températures, la transformation des activités de récolte du bois pour palier les conditions du sol non gelé et l'exploitation d'un nombre croissant de coupes de récupération. Les exemples de planification proactive de l'adaptation aux éventuels changements climatiques sont plus rares. Les études de cas compilées par les membres de la Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie (TRNEE, 2012a) font état des activités d'adaptation aux changements climatiques de certaines sociétés d'exploitation de ressources (J.D. Irving et Tolko Industries dans le secteur forestier, Rio Tinto Alcan dans le secteur minier et Entergy Corporation, BC Hydro et Hydro-Québec dans le secteur de l'électricité). Ces exemples prouvent que les mesures d'adaptation ont fait leur entrée dans la culture de l'industrie des ressources naturelles, comme c'est le cas dans les autres secteurs de l'économie canadienne.

On note qu'il existe un certain nombre d'obstacles et d'instruments d'habilitation en matière d'adaptation dans les secteurs des ressources naturelles. Les derniers changements d'importance à survenir au Canada sont principalement liés aux moteurs économiques à court terme, comme le rendement économique mondial, le prix des produits de base et des questions relatives au commerce international. Afin de demeurer concurrentiels sur les marchés continentaux et mondiaux, les investissements dans la viabilité à long terme se classent parfois parmi les priorités de faible importance. Toutefois, le fait qu'il y ait des changements rapides qui s'opèrent au sein des secteurs des ressources naturelles, particulièrement dans le contexte du développement économique nord-américain, offre aussi des possibilités en matière d'adaptation

du moment que les changements climatiques fassent partie intégrante d'un processus élargi de prise de décisions.

Le niveau de connaissances limité des secteurs des ressources naturelles au sujet de la portée potentielle, de l'ampleur et de la pertinence fonctionnelle des répercussions des changements climatiques, ainsi que les incertitudes concernant les prévisions relatives à la nature précise de ses changements, font partie des raisons qui ont été invoquées pour justifier les progrès limités en matière d'adaptation (TRNEE, 2012b). De plus, les entreprises ont une résilience comparativement élevée à de nombreux changements climatiques projetés, étant donné que la plupart d'entre elles exploitent leurs installations dans divers milieux soumis à des conditions extrêmes. Malgré tout, l'évaluation exhaustive des risques peut permettre de repérer les nouvelles vulnérabilités, y compris celles liées aux perturbations dans les infrastructures publiques.

Les processus que l'on présente comme nouveaux instruments d'habilitation en matière d'adaptation dans les secteurs des ressources naturelles comprennent les évaluations environnementales, la divulgation publique des risques et la présentation de rapports concernant l'aménagement forestier durable. La dernière mesure fait partie des exigences établies par la loi (mise à jour en 2012 dans le cas des compétences fédérales) pour tous les grands projets de développement qui ont comme objectif de réduire les incidences possibles de ces projets sur l'environnement avant leur mise en chantier et de s'assurer que les mesures d'atténuation des risques sont en place une fois que le projet est amorcé. De telles évaluations prennent systématiquement en considération les effets des changements climatiques sur le projet proposé, par le biais de l'orientation et des études de cas fournies par le comité fédéral-provincial-territorial de la *Convention sur le changement climatique et l'évaluation environnementale* (2003). La divulgation publique de l'information, comme dans le cadre du Carbon Disclosure Project (projet de divulgation du carbone; voir l'étude de cas 7), sert à renseigner les investisseurs sur la façon dont les sociétés cotées en bourse évaluent et gèrent le risque matériel lié aux changements climatiques (CDP, 2010). Même si l'analyse des données divulguées par la US Securities and Exchange Commission démontre que la qualité des données divulguées concernant le risque climatique est habituellement inadéquate et ne permet pas aux investisseurs d'évaluer précisément le niveau de risque et le rendement éventuels (Ceres, 2012), elle met en évidence l'utilité de ce processus favorisant l'adaptation qui encourage à la fois les investisseurs et les organismes de réglementation à insister pour qu'on apporte des améliorations quant à la qualité de la divulgation.

Dans un grand nombre de cas, il existe des solutions d'ingénierie et de planification visant à aider les entreprises du secteur des ressources naturelles et les collectivités locales à se préparer et à s'adapter aux changements climatiques. La possibilité d'élaborer des stratégies d'adaptation efficaces dans le secteur des ressources naturelles au Canada est énorme et le niveau de collaboration qui existe entre les entreprises, les organismes de réglementation, les scientifiques et autres intervenants afin de définir des stratégies d'adaptation pratiques qui pourront être intégrées à la planification et aux activités contribuera grandement à la probabilité de réussite. Les gestionnaires du secteur des ressources naturelles au Canada auront la possibilité de partager leur expérience au chapitre de l'adaptation aux changements climatiques avec des planificateurs et des gestionnaires d'autres secteurs, aussi bien au Canada qu'à l'échelle internationale.

RÉFÉRENCES

- AIE (Agence internationale de l'énergie). *World Energy Outlook 2011*, Paris, 2011a.
- AIE (Agence internationale de l'énergie). *Impact of Smart Grid Technologies on Peak Load to 2050*, Paris, 2011b.
- Aitken, S.N., S. Yeaman, J.A. Holliday, T. Wang et S. Curtis-McLane. « Adaptation, migration or extirpation: Climate change outcomes for tree populations », *Evolutionary Applications*, vol. 1, n° 1, 2008, pp. 95–111.
- Ali, A.A., O. Blarquez, C. Hély, F. Tinquaut, A. El Guellab, V. Valsecchi, A. Terrier, L. Bremond, A. Genies, S. Gauthier et Y. Bergeron. « Control of the multimillennial wildfire size in boreal North America by spring climatic conditions », *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 109, n° 51, 2012, pp. 20966–20970.
- Allan, C. et S.G. Stankey. *Adaptive Environmental Management: a Practitioner's Guide*, Springer, 2009, 352 p.
- Allen, C.D., A.K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. McDowell, M. Vennetier et N. Cobb. « A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests », *Forest Ecology and Management*, vol. 259, n° 4, 2010, pp. 660–684.
- Amiro, B.D., A. Cantin, M.D. Flannigan et W.J. De Groot. « Future emissions from Canadian boreal forest fires », *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 39, n° 2, 2009, pp. 383–395.
- APFC (Association des produits forestiers du Canada). *Certification Canada*, 2012, <<http://www.certificationcanada.org/francais/certification/>>.
- Auld, H., N. Comer et S. Fernandez. Technical Guide – *Infrastructure in permafrost: A guideline for climate change adaptation*, Canadian Standards Association (CSA) Special Publication, 2010.
- Balshi, M.S., A.D. McGuire, P. Duffy, M.D. Flannigan, J. Walsh et J.M. Melillo. « Assessing the response of area burned to changing climate in western boreal North America using a multivariate adaptive regression splines (MARS) approach », *Global Change Biology*, vol. 15, 2009, pp. 578–600.
- Barber, V.A., G.P. Juday et B.P. Finney. « Reduced growth of Alaskan white spruce in the twentieth century from temperature-induced drought stress », *Nature*, vol. 405, n° 6787, 2000, pp. 668–673.
- BCMFLNRO (BC Ministry of Forests, Lands and Natural Resources Operations). *Climate based upward elevation changes*, 2008, <<http://www.for.gov.bc.ca/code/cfstandards/amendmentNov08.htm>>.
- BCMFLNRO (BC Ministry of Forests, Lands and Natural Resources Operations). *Assisted range and population expansion of western larch for use as a climate change adaptation strategy in British Columbia*, 2010, <<http://www.for.gov.bc.ca/code/cfstandards/amendmentJun10.htm>>.
- BCMFLNRO (BC Ministry of Forests, Lands and Natural Resource Operations). A history of the battle against the mountain pine beetle, 2012.
- BCP (Bureau du Conseil privé). Le partage constitutionnel des pouvoirs législatifs, 2010, <<http://www.pco-bcp.gc.ca/aia/index.asp?lang=fra&page=federal&sub=legis&doc=legis-fra.htm>>.
- Beaubien, E. et A. Hamann. « Spring flowering response to climate change between 1936 and 2006 in Alberta, Canada », *Bioscience*, vol. 61, no 7, 2011, pp. 514–524.
- Beauchamp, J. *Estimation d'une PMP et d'une CMP d'un bassin versant septentrional, en contexte de changements climatiques*, École de technologie supérieure, Montréal, 2010.
- Bell, T., J.D. Jacobs, A. Munier, P. Leblanc et A. Trant. *Climate change and renewable resources in Labrador: looking toward 2050*, comptes rendus et rapport d'une conférence tenue du 11 au 13 mars, à North West River (Labrador), Labrador Highlands Research Group, Memorial University of Newfoundland, St. John's, 95 p. et CD-ROM, 31 mars, 2008.
- Bernier, P. et Schoene, D. « Adapting forests and their management to climate change: an overview », *Unasylva*, vol. 60, n° 231–232, 2009, pp. 5–11.
- Boyer, C., D. Chaumont, I. Chartier et A.G. Roy. « Impact of climate change on the hydrology of St. Lawrence tributaries », *Journal of Hydrology*, vol. 384, 2010, pp. 65–83.
- Bruce, J.P. « Oil and water – will they mix in a changing climate? The Athabasca River story », dans *Implications of a 2°C Global Temperature Rise on Canada's Water Resources: Athabasca River and Oil Sands Development, Great Lakes and Hydropower Production*, T. Tin (éd.), rapport rédigé pour le Sage Centre, 2006, pp. 12–34, <http://www.tidescanada.org/cms/File/sagereport_nov0106.pdf>.
- Burns, R.M. et B.H. Honkala. *Silvics of North America: 1. Conifers; 2. Hardwoods*, Agriculture handbook 654, Department of Agriculture, Forest Service, Washington (DC), 1990.
- Buttle, J., T. Muir et J. Frain. « Economic impacts of climate change on the Canadian Great Lakes hydro-electric power producers: a supply analysis », *Canadian Water Resources Journal*, vol. 92, 2004, pp. 89–110.
- CAPP (Association canadienne des producteurs pétroliers). *Sables bitumineux maintenant : utilisation de l'eau, 2012*, <<http://www.sablesbitumineuxmaintenant.ca/topics/WaterUse/Pages/Default.aspx>>.
- Caya, D. et R. Laprise. « A semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model: the Canadian RCM », *Monthly Weather Review*, vol. 127, n° 3, 1999, pp. 341–362.
- CBC (Canadian Broadcasting Corporation). « Forest fire smoke blankets Timmins, Ontario », CBC News, 24 mai 2012.
- CCMF (Conseil canadien des ministres des forêts). *Cadre des critères et indicateurs du CCMF 2005*, Conseil canadien des ministres des forêts, Ottawa, 2006, 1 p., <<http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/32561.pdf>>.
- CCMF (Conseil canadien des ministres des forêts). *Une vision pour les forêts du Canada : 2008 et au-delà*, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Ottawa (Ontario), 2008.
- CCMF (Conseil canadien des ministres des forêts). *Adapter l'aménagement forestier durable aux changements climatiques : préparer l'avenir*. Les changements climatiques, 2013a, <<http://www.ccfm.org/francais/coreproducts-cc.asp>>.
- CCMF (Conseil canadien des ministres des forêts). *Adapter l'aménagement forestier durable aux changements climatiques : une approche systématique d'exploration de l'état de préparation organisationnelle*, 2013b, <<http://www.ccfm.org/francais/coreproducts-cc.asp>>.
- CCMF (Conseil canadien des ministres des forêts). *Adapter l'aménagement forestier durable aux changements climatiques : cadre d'évaluation de la vulnérabilité et d'intégration des mesures d'adaptation dans le processus décisionnel*, 2013c, <<http://www.ccfm.org/francais/coreproducts-cc.asp>>.
- CCMF (Conseil canadien des ministres des forêts). *Adapter l'aménagement forestier durable aux changements climatiques : emploi de scénarios dans l'évaluation de la vulnérabilité*, 2013d <<http://www.ccfm.org/francais/coreproducts-cc.asp>>.
- CDP (Carbon Disclosure Project). *Rapport du Carbon Disclosure Project 2010 : Canada 200*, 2010, <<https://www.cdproject.net/CDPResults/CDP-2010-Canada-Report-french.pdf>>.
- CEPA (Association canadienne de pipelines d'énergie). *About pipelines 2012 – our energy connections*, 2012, <http://www.cepa.com/wp-content/uploads/2012/12/CEPA_Factbook-Dec-4.pdf>.
- CEPA (Association canadienne de pipelines d'énergie). *About pipelines 2012 – our energy connections*, 2012, <http://www.cepa.com/wp-content/uploads/2012/12/CEPA_Factbook-Dec-4.pdf>.
- Ceres. *Sustainable extraction? An analysis of SEC disclosure by major oil and gas companies on climate risk and deepwater drilling risk*, Ceres Inc., Boston, Massachusetts, 2012, 42 p.
- Chhin, S., E.H. Hogg, V.J. Lieffers et S. Huang. « Potential effects of climate change on the growth of lodgepole pine across diameter size classes and ecological regions », *Forest Ecology and Management*, vol. 256, n° 10, 2008, pp. 1692–1703.
- Chiotti, Q. et B. Lavender. « Ontario », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 227–274.
- CIGB (Commission internationale des grands barrages). *Tailings dams: risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences*, Bulletin 121, ICOLD Committee on Tailings Dams and Waste Lagoons, 2001, 144 p., <<http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/2891-TailingsDams.pdf>>.
- Comité fédéral-provincial-territorial sur le changement climatique et l'évaluation environnementale. *Intégration des considérations relatives au changement climatique et l'évaluation environnementale: Guide général des praticiens*, 2003, <<http://www.ceaa-acee.gc.ca/Content/A/4/1/A41F45C5-1A79-44FA-9091-D251EEE18322.pdf>>.
- Commissaire à l'environnement de l'Ontario. *Prêt pour un changement? Évaluation de la stratégie ontarienne d'adaptation au changement climatique*, Commissaire à l'environnement de l'Ontario, Toronto (Ontario), 2012.
- Côté, P., D. Haguma, R. Leconte et S. Krau. « Stochastic optimisation of hydro-Quebec hydropower installations: A statistical comparison between SDP and SSDP methods », *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 38, n° 12, 2011, pp. 1427–1434.
- Cullingham, C.I., J.E.K. Cooke, S. Dang, C.S. Davis, B.J. Cooke et D.W. Coltman. « Mountain pine beetle host-range expansion threatens the boreal forest », *Molecular Ecology*, vol. 20, n° 10, 2011, pp. 2157–2171.
- CVRD Inco. *Toward sustainability*, 2006, 66 p., <http://nickel.vale.com/sustainability/pdf/Toward_Sustainability_20007.pdf>. Desrochers, G., R. Roy, L. Roy, G. Pasher, F. Guay et D. Tapsoba. *Comparing methods to investigate the impacts of climate change*, présentation faite à la 2009 AWRA Spring Specialty Conference: Managing Water Resources Development in a Changing Climate, Anchorage, Alaska, 2009, 22 p.

- Easterling, W.E., P.K. Aggarwal, P. Batima, K.M. Brander, L. Erda, S.M. Howden, A. Kirilenko, J. Morton, J.-F. Soussana, J. Schmidhuber et F.N. Tubiello. « Food, fibre and forest products », dans *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, contribution du Groupe de travail II au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2007, pp. 273-313.
- Ebinger, J. et W. Vergara. *Climate impacts of energy systems: key issues for energy sector adaptation*, Banque mondiale, Washington (DC), 2011, 178 p.
- Environnement Canada. *Code de pratiques écologiques pour les mines de métaux*, Ottawa (Ontario), 2009, 108 p., <<http://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/documents/codes/mm/mm-fra.pdf>>.
- Environnement Canada. *Withdrawal uses, thermal power generation*, 2012, <<http://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=En&n=851B096C-1#TPG>>.
- ESRD (Alberta Environment and Sustainable Resource Development). *Athabasca River conditions and use*, Alberta Environment and Sustainable Resource Development, 2013, <<http://www.environment.alberta.ca/apps/OSEM/>>.
- Field, C.B., L.D. Mortsch, M. Brklacich, D.L. Forbes, P. Kovacs, J.A. Patz, S.W. Running et M.J. Scott. « North America », dans *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Contribution du Groupe de travail II au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2007, pp. 617-652.
- Fischlin, A., G.F. Midgley, J.T. Price, R. Leemans, B. Gopal, C. Turley, M.D.A. Rounsevell, O.P. Dube, J. Tarazona et A.A. Velichko. « Ecosystems, their properties, goods, and services », dans *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, contribution du Groupe de travail II au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2007, pp. 211-272.
- Flannigan, M., B. Stocks, M. Turetsky et M. Wotton. « Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest », *Global Change Biology*, vol. 15, n° 3, 2009, pp. 549-560.
- Flat Top Complex Wildfire Review Committee. *Flat top complex: final report from the Flat Top Complex Wildfire Review Committee*, Alberta Ministry of Environment and Sustainable Resource Development, Edmonton (Alberta), 2012.
- Ford, J.D., T. Pearce, J. Prno, F. Duerden, L. Berrang Ford, M. Beaumier et T. Smith. « Perceptions of climate change risks in primary resource use industries: a survey of the Canadian mining sector », *Regional Environmental Change*, vol. 10, no 1, 2010, pp. 65-81.
- Ford, J.D., T. Pearce, J. Prno, F. Duerden, L.B. Ford, T.R. Smith et M. Beaumier. « Canary in a coal mine: perceptions of climate change risks and response options among Canadian mine operations », *Climatic Change*, vol. 109, no 3-4, 2011, pp. 399-415.
- Fortin, L.G., R. Turcotte, S. Pugin, J.-F. Cyr et J.-F. Picard. « Impact des changements climatiques sur les plans de gestion des lacs Saint-François et Aylmer au sud du Québec », *Revue Canadienne de Génie Civil*, vol. 34, 2007, pp. 934-945.
- Furgal, C. et T.D. Prowse. « Nord du Canada », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 57-118.
- Gauthier, S., P. Bernier, P.J. Burton, K. Isaac, N. Isabel, T. Williamson, H. Le Goff. « Adaptation in the managed Canadian boreal forest », *Environmental Reviews*, en révision.
- Geller, H., P. Harrington, A.H. Rosenfeld, S. Tanishima et F. Unander. « Policies for increasing energy efficiency: thirty years of experience in OECD countries », *Energy Policy*, vol. 34, no 5, 2006, pp. 556-573.
- Georgakakos, A.P., H. Yao, M. Kistenmacher, K.P. Georgakakos, N.E. Graham, F.-Y. Cheng, C. Spencer et E. Shamir. « Value of adaptive water resources management in northern California under climatic variability and change: reservoir management », *Journal of Hydrology*, vol. 412-413, 2012, pp. 34-46.
- GIÉC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). « Résumé à l'intention des décideurs », dans *Changements climatiques 2007 : les éléments scientifiques*, contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor et H.L. Miller (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2007.
- Girardin, M.P. « Interannual to decadal changes in area burned in Canada from 1781 to 1982 and the relationship to northern hemisphere land temperatures », *Global Ecology and Biogeography*, vol. 16, n° 5, 2007, pp. 557-566.
- Girardin, M.P. et B.M. Wotton. « Summer moisture and wildfire risks across Canada », *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 48, 2009, pp. 517-533.
- Girardin, M.P., F. Raulier, P.Y. Bernier et J.C. Tardif. « Response of tree growth to a changing climate in boreal central Canada: a comparison of empirical, process-based and hybrid modelling approaches », *Ecological Modelling*, vol. 213, n° 2, 2008, pp. 209-228.
- Girardin, M.P., X.J. Guo, P.Y. Bernier, F. Raulier et S. Gauthier. « Changes in growth of pristine boreal North American forests from 1950 to 2005 driven by landscape demographics and species traits », *Biogeosciences*, vol. 9, 2012, pp. 2523-2536.
- Global Forest Watch. *Hydropower developments in Canada: number, size and jurisdictional and ecological distribution*, 2012, <http://www.globalforestwatch.ca/pubs/2012Energy/02Hydro/Hydro1_Number_Size_Distribution.pdf>.
- Goulding, H.E.A. *Yukon water: a summary of climate change vulnerabilities*, Environnement Yukon, gouvernement du Yukon, Canada, 2011.
- Gupta, R. et M. Gregg. « Using UK climate change projections to adapt existing English homes for a warming climate », *Building and Environment*, vol. 55, 2012, pp. 20-42.
- Haguma, D. *Gestion des ressources hydriques adaptée aux changements climatiques pour la production optimale d'hydroélectricité. Étude de cas: bassin versant de la rivière Manicouagan*, thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, 2012, 237 p.
- Hamlet, A.F., S.Y. Lee, K.E.B. Mickelson et M.M. Elsner. « Effects of projected climate change on energy supply and demand in the Pacific Northwest and Washington State », chapitre 4 dans *The Washington Climate Change Impacts Assessment: Evaluating Washington's Future in a Changing Climate*, Climate Impacts Group, University of Washington, Seattle, 2009.
- Harrison, G.P., L.C. Cradden, A. Zacheshigriya, S. Nairn et J.P. Chick. *Sensitivity of thermal power generation to climate change*, UK Met Office, 2009, 2 p.
- Haughian, S.R., P.J. Burton, S.W. Taylor et C.L. Curry. « Expected effects of climate change on forest disturbance regimes in British Columbia », *BC Journal of Ecosystems and Management*, vol. 13, n° 1, 2012, pp. 16-39.
- Hicke, J.A., C.D. Allen, A.R. Desai, M.C. Dietze, R.J. Hall, E.H.T. Hogg, D.M. Kashian, D. Moore, K.F. Raffa, R.N. Sturrock et J. Vogelmann. « Effects of biotic disturbances on forest carbon cycling in the United States and Canada », *Global Change Biology*, vol. 18, n° 1, 2012, pp. 7-34.
- Hogg, E.H., J.P. Brandt et M. Michaelian. « Impacts of a regional drought on productivity, dieback and biomass of western Canadian aspen forests », *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 38, n° 6, 2008, pp. 1373-1384.
- ICF Marbek. *Adaptation to a changing climate in the energy sector*, rapport remis à la Division des impacts et de l'adaptation liés aux changements climatiques, Ressources naturelles Canada, 2012, 88 p.
- IESO (Independent Electricity System Operator). *The Ontario reliability outlook*, Toronto, 2009, <http://www.ieso.ca/imoweb/pubs/marketReports/ORO_Report-Dec2009.pdf>.
- IMG-Golder Corporation. *Vulnerability assessment of the mining sector to climate change, Nunavut Regional adaptation Collaborative*, 2012, 98 p.
- Instanes, A., O.A. Anisimov, L. Brigham, D. Goering, L. Khrustalev, B. Ladanyi et J.O. Larsen. « Infrastructure: buildings, support systems and industrial facilities », chapitre 16 dans *Arctic Climate Impact Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2005.
- International Wood Markets Group. *BC Interior Mountain Pine Beetle Report*, 2010, 154 p.
- Isaac, M. et D.P. van Vuuren. « Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change », *Energy Policy*, vol. 37, n° 2, 2009, pp. 507-521.
- Johnston, M. et H. Hessel. « Climate change adaptive capacity of the Canadian forest sector », *Forest Policy and Economics*, vol. 24, 2012, pp. 29-34.
- Johnston, M., M. Campagna, P. Gray, H. Kope, J. Loo, A.M. Ogdén, G.A. O'Neill, D. Price et T. Williamson. *Vulnérabilité des arbres du Canada aux changements climatiques et propositions de mesures visant leur adaptation : un aperçu destiné aux décideurs et aux intervenants du monde forestier*, Conseil canadien des ministres des forêts, Ottawa (Ontario), 2009.
- Johnston, M.H. et J.E. Edwards. *Adapting sustainable forest management to climate change: an analysis of Canadian case studies*, Conseil canadien des ministres des forêts, Ottawa (Ontario), sous presse.
- Jones, H.P., D.G. Hole et E.S. Zavaleta. « Harnessing nature to help people adapt to climate change », *Nature Climate Change*, vol. 2, 2012, pp. 504-509.
- Jost, G., R.D. Moore, B. Menounos et R. Wheate. « Quantifying the contribution of glacier runoff to streamflow in the upper Columbia river basin, Canada », *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 16, n° 3, 2012, pp. 849-860.
- Kasischke, E.S. et M.R. Turetsky. « Recent changes in the fire regime across the North American boreal region – spatial and temporal patterns of burning across Canada and Alaska », *Geophysical Research Letters*, vol. 33, n° 9, 2006.

- Kienzle, S.W., M.W. Nemeth, J.M. Byrne et R.J. MacDonald. « Simulating the hydrological impacts of climate change in the upper north Saskatchewan river basin, Alberta, Canada », *Journal of Hydrology*, vol. 412-413, 2012, pp. 76-89.
- Klein, R.J.T., S. Huq, F. Denton, T.E. Downing, R.G. Richels, J.B. Robinson et F.L. Toth. « Inter-relationships between adaptation and mitigation », dans *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2007, pp. 745-777.
- Kurz, W.A., C.C. Dymond, G. Stinson, G.J. Rampley, E.T. Neilson, A.L. Carroll, T. Ebata et L. Safranyik. « Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change », *Nature*, vol. 452, 2008, pp. 987-990.
- Lapointe-Garant, M., J. Huang, G. Gea-Izquierdo, F. Raulier, P. Bernier et F. Berninger. « Use of tree rings to study the effect of climate change on trembling aspen in Québec », *Global Change Biology*, vol. 16, n° 7, pp.2039-2051.
- Le Goff, H., M.D. Flannigan et Y. Bergeron. « Potential changes in monthly fire risk in the eastern Canadian boreal forest under future climate change », *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 39, n° 12, 2009, pp. 2369-2380.
- Le Goff, H., M.D. Flannigan, Y. Bergeron et M.P. Girardin. « Historical fire regime shifts related to climate teleconnections in the Waswanipi area, central Quebec, Canada », *International Journal of Wildland Fire*, vol. 16, n° 5, 2007, pp. 607-618.
- Lebel, M., E. Kerhoven, R. Bothe, J. Hornung et D. Ohlson. *Climate change sensitivity analysis*, rapport rédigé pour la Phase 2 Framework Committee, Volume 2, Technical Annex, Cumulative Environmental Management Association, 2009, <http://cemaonline.ca/index.php/administration/cat_view/2-communications/44-p2wmf>.
- Lemmen, D.S., F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.) *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008a, 448 p.
- Lemmen, D., F. Warren et J. Lacroix. « Synthèse », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush, Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008b, pp. 1-20.
- Lemprière, T.C., P.Y. Bernier, A.L. Carroll, M.D. Flannigan, R.P. Gilson, D.W. McKenney, E.H. Hogg, J.H. Pedlar et D. Blain. *L'importance d'adapter le secteur forestier aux changements climatiques*, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alberta), Rapport d'information NOR-X-416F, 2008, 88 p.
- Leong, H. « Marine systems », chapitre 9 dans *Arctic Climate Impact Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2005.
- Levine, M., D. Ürge-Vorsatz, K. Blok, L. Geng, D. Harvey, S. Lang, G. Levermore, A. Mongameli Mehlwana, S. Mirasgedis, A. Novikova, J. Rilling et H. Yoshino. « Residential and commercial buildings », dans *Climate Change 2007: Mitigation*, contribution du Groupe de travail III au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave et L.A. Meyer (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2007.
- Lilley, W., J. Hayward et L. Reedman. « Chapter 7 – realizing the potential of renewable and distributed generation », dans *Smart Grid*, F.P. Sioshansi (éd.), Academic Press, Boston, 2012, pp. 161-183.
- Lin, Q.G., G.H. Huang et B. Bass. « Impacts from climate change and adaptation responses on energy economy and greenhouse gas emissions in the Toronto-Niagara region, Canada », *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, vol. 33, n° 17, 2011, pp. 1581-1597.
- Ma, Z., C. Peng, Q. Zhu, H. Chen, G. Yu, W. Li, X. Zhou, W. Wang et W. Zhang. « Regional drought-induced reduction in the biomass carbon sink of Canada's boreal forests », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 109, 2012, pp. 2423-2427.
- Marshall, B. *Facts and figures of the Canadian mining industry*, Mining Association of Canada, <<http://www.mining.ca/www/media/lib/MAC Documents/Publications/2013/Facts%20and%20Figures/FactsandFigures2012Eng.pdf>>.
- McColl, L., A. Angelini et R. Betts. *Climate Change Risk Assessment for the Energy Sector*, UK Climate Change Risk Assessment, 2012, 134 p., <http://randd.defra.gov.uk/Document.aspx?Document=10074_CCRfortheEnergySector16July2012.pdf>.
- McGrath, T. et J. Ellingsen. *The effects of hurricane Juan on managed stands commercially thinned in central Nova Scotia*, Forest Research Report FOR 2009-4 No. 89, ministère des Ressources naturelles de la Nouvelle-Écosse, Halifax, Nouvelle-Écosse, 2009.
- McKenney, D.W., J.H. Pedlar, R.B. Rood et D. Price. « Revisiting projected shifts in the climate updates of North American trees using updated general circulation models », *Global Change Biology*, vol. 17, 2011, pp. 2720-2730.
- McKenney, D.W., J.H. Pedlar, K. Lawrence, K. Campbell et M.F. Hutchinson. « Potential impacts of climate change on the distribution of North American trees », *Bioscience*, vol. 57, n° 11, 2007, pp. 939-948.
- Michaelian, M., E.H. Hogg, R.J. Hall et E. Arseneault. « Massive mortality of aspen following severe drought along the southern edge of the Canadian boreal forest », *Global Change Biology*, vol. 17, n° 6, 2011, pp. 2084-2094.
- Mideksa, T.K. et S. Kallbekken. « The impact of climate change on the electricity market: a review », *Energy Policy*, vol. 38, n° 7, 2010, pp. 3579-3585.
- Millar, C.I., N.L. Stephenson et S.L. Stephens. « Climate change and forests of the future: managing in the face of uncertainty », *Ecological Applications*, vol. 17, no 8, 2007, pp. 2145-2151.
- Mills, E. « Synergisms between climate change mitigation and adaptation: an insurance perspective », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 12, n° 5, 2007, pp. 809-842.
- Minville, M., F. Brissette et R. Leconte. « Impacts and uncertainty of climate change on water resource management of the Peribonka River System (Canada) », *ASCE Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 136, n° 3, 2010a, pp. 376-385.
- Minville, M., F. Brissette et R. Leconte. « Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a Nordic watershed », *Journal of Hydrology*, vol. 358, n° 1-2, 2008, pp. 70-83.
- Minville, M., F. Brissette, S. Krau et R. Leconte. « Adaptation to climate change in the management of a Canadian water-resources system exploited for hydropower », *Water Resources Management*, vol. 23, n° 14, 2009, pp. 2965-2986.
- Minville, M., F. Brissette, S. Krau et R. Leconte. « Adaptation to climate change in the management of a Canadian water-resources system exploited for hydropower », *Water Resources Management*, vol. 23, n° 14, 2012, pp. 2965-2986.
- Minville, M., S. Krau, F. Brissette et R. Leconte. « Behaviour and performance of a water resource system in Québec (Canada) under adapted operating policies in a climate change context », *Water Resources Management*, vol. 24, n° 7, 2010b, pp. 1333-1352.
- Mohan, J.E., R.M. Cox et L.R. Iverson. « Composition and carbon dynamics of forests in northeastern North America in a future, warmer world », *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 39, n° 2, 2009, pp. 213-230.
- Music, B. et C. Sykes. *CRCM diagnostics for future water resources in OPG priority watersheds*, Consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, 2011.
- NERC (North American Electric Reliability Corporation). *Long term reliability assessment*, Atlanta, 2012, <http://www.nerc.com/files/2012_LTRA_FINAL.pdf>.
- Newsham, G.R., B.J. Birt et I.H. Rowlands. « A comparison of four methods to evaluate the effect of a utility residential air-conditioner load control program on peak electricity use », *Energy Policy*, vol. 39, n° 10, 2011, pp. 6376-6389.
- OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques). *Glossary of statistical terms*, Organisation de coopération et de développement économiques, 2012, <<http://stats.oecd.org/glossary/>>.
- Ochudho, T., V. Lantz, P. Loyd-Smith et P. Benitez. « Regional economic impacts of climate change and adaptation in Canadian forests: a CGE modeling analysis », *Forest Policy and Economics*, vol. 25, 2012, pp. 100-112.
- Ogden, A.E. et J. Innes. « Incorporating climate change adaptation considerations into forest management planning in the boreal forest », *International Forestry Review*, vol. 9, n° 3, 2007, pp. 713-733.
- Ogden, A.E. et J.L. Innes. « Application of structured decision making to an assessment of climate change vulnerabilities and adaptation options for sustainable forest management », *Ecology and Society*, vol. 14, n° 1, 2009.
- Ohlson, D., G. Long et T. Hatfield. *Phase 2 Framework Committee report*, Cumulative Environmental Management Association, 2010, <http://cemaonline.ca/index.php/administration/cat_view/2-communications/44-p2wmf>.
- ONE (Office national de l'énergie). *Aperçu des cadres de gestion de la fiabilité du service d'électricité au Canada*, Calgary, 2004.
- ONE (Office national de l'énergie). *Revue des forages extracôtiers dans l'Arctique canadien*, Calgary, 2011, 54 p., <<http://www.neb-one.gc.ca/clf-nsi/rthnb/pplctnsbfrthnb/rctcfshrdrlngvrw/fnlrprt2011/fnlrprt2011-fra.html>>.
- Ouranos. *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. Ouranos, Montréal, 2010.
- Pan, Y., R.A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P.E. Kauppi, W.A. Kurz, O.L. Phillips, A. Shvidenko, S.L. Lewis, J.G. Canadell, P. Ciais, R.B. Jackson, S.W. Pacala, A.D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch et H. Hayes. « A large and persistent carbon sink in the world's forests », *Science*, vol. 333, n° 6045, 2011, pp. 988-993.

- Pearce, T., J. Ford, J. Prno, F. Duerden, L. Berrang-Ford, T. Smith et M. Marshall. *Climate change impacts and adaptations in the Canadian mining sector*, 2009.
- Pearce, T.D., J.D. Ford, J. Prno, F. Duerden, J. Pittman, M. Beaumier et B. Smit. « Climate change and mining in Canada », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 16, n° 3, 2011, pp. 347-368.
- Pedlar, J.H., McKenney, D.W., I. Aubin, T. Beardmore, J. Beaulieu, L. Iverson, G.A. O'Neill, R.S. Winder et C. Ste-Marie. « Placing forestry in the assisted migration debate », *Bioscience*, vol. 62, n° 10, 2012, pp. 835-842.
- Peng, C., Z. Ma, X. Lei, O. Zhu, H. Chen, W. Wang, S. Liu, W. Li, X. Fang et X. Zhou. « A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests », *Nature Climate Change*, vol. 1, n° 9, 2011, pp. 467-471.
- Price, D.T., R.I. Alfaro, K.J. Brown, M. Flannigan, R.A. Fleming, E.H. Hogg, M.P. Girardin, T. Lakusta, M. Johnston, J. Pedlar, D.W. McKenney, T. Stratton R. Sturrock, I. Thompson, J.A. Trofymow et L.A. Venier. « Anticipating the consequences of climate change for Canada's boreal forest ecosystems », *Environmental Reviews*, en révision.
- Projet de recherche sur les politiques. *Adaptation aux changements climatiques dans le secteur canadien de l'énergie : rapport d'atelier*, Projet de recherche sur les politiques, 2009, 25 p., <<http://www.horizons.gc.ca/sites/default/files/Publication-alt-format/2009-0004-fra.pdf>>.
- Prowse, T.D., C. Furgal, R. Chouinard, H. Melling, D. Milburn et S.L. Smith. « Implications of climate change for economic development in Northern Canada: energy, resource, and transportation sectors », *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, vol. 38, n° 5, 2009, pp. 272-281.
- Raje, D. et P.P. Mujumdar. « Reservoir performance under uncertainty in hydrologic impacts of climate change », *Advances in Water Resources*, vol. 33, n° 3, 2010, pp. 312-326.
- Ressources naturelles Canada. *Régions forestières du Canada*, Ressources naturelles Canada, 2000, <<http://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/25628.pdf>>.
- Ressources naturelles Canada. *Toutes les communautés dépendantes des ressources*, 2001, Ressources naturelles Canada, Atlas du Canada, 2009, <<http://geogatis.gc.ca/api/fr/nrcan-rncan/ess-sst/d2f00430-8893-11e0-a7f4-6cf049291510.html>>.
- Ressources naturelles Canada. *Eau douce : le rôle et la contribution de Ressources naturelles Canada*, Ressources naturelles Canada, 2010, <<http://www.nrcan.gc.ca/developpement-durable/eau-douce/2603>>.
- Ressources naturelles Canada. *L'état des forêts au Canada : rapport annuel 2011*, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Ottawa, 2011a.
- Ressources naturelles Canada. *Évolution de l'efficacité énergétique au Canada*, de 1990 à 2009, Ressources naturelles Canada, 15e éd, 2011b.
- Ressources naturelles Canada. *Définir l'opportunité : évaluation de l'impact économique des secteurs de l'énergie et des mines au Canada*, conférence des ministres de l'Énergie et des Mines, septembre 2012, Charlottetown, Î.-P.-É., 2012a, 23 p., <<http://www.scics.gc.ca/francais/conferences.asp?a=viewdocument&id=1907>>.
- Ressources naturelles Canada. *L'état des forêts au Canada, Rapport annuel 2012*, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Administration centrale, Ottawa, 2012b, 52 p., <<http://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=34056>>.
- Ressources naturelles Canada. *La menace que présente le dendroctone du pin ponderosa sur la forêt boréale canadienne*, Ressources naturelles Canada, 2012c, <http://scf.nrcan.gc.ca/pages/49?lang=fr_CA>.
- Ressources naturelles Canada. *Principales régions minières du Canada*, Carte 900A de la Commission géologique du Canada, 61e éd., 2011, Secteur des minéraux et des métaux et Office national de l'énergie, échelle 1/6 000 000, 2012d.
- Ressources naturelles Canada. *Énergie*, Ressources naturelles Canada, 2012e, <<http://www.nrcan.gc.ca/statistiques-faits/energie/894>>.
- Ressources naturelles Canada. *À propos de l'énergie renouvelable*, Ressources naturelles Canada, 2012f, <<http://www.nrcan.gc.ca/energie/renouvelable/1616>>.
- Ressources naturelles Canada. *L'Atlas du Canada – Énergie*, Ressources naturelles Canada, 2012g, <<http://atlas.gc.ca/site/francais/maps/energy.html>>.
- Ressources naturelles Canada. *Key facts and figures of Canada's Natural Resources Sector*, concentrateur de données de Ressources naturelles Canada, 2013a.
- Ressources naturelles Canada. *Cahier d'information – les marchés de l'énergie*, 2013-2014, Ressources naturelles Canada, 2013b, <<http://publications.gc.ca/site/fr/449640/publication.html>>.
- Rodenhuis, D., B. Music, M. Braun et D. Caya. *Climate diagnostics of future water resources in BC watersheds*, Pacific Climate Impacts Consortium, University of Victoria, 2011, 74 p.
- Rübbelke, D. et S. Vögele. *Distributional consequences of climate change impacts on the power sector: who gains and who loses?*, CEPS Document de travail no. 349, Centre pour l'étude des politiques publiques européennes, 2011, 18 p.
- Sathaye, J., A. Najam, C. Cocklin, T. Heller, F. Lecocq, J. Llanes-Regueiro, J. Pan, G. Petschel-Held, S. Rayner, J. Robinson, R. Schaeffer, Y. Sokona, R. Swart et H. Winkler. « Sustainable development and mitigation », dans *Climate Change 2007: Mitigation*, contribution du Groupe de travail III au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, New York, États-Unis, 2007.
- Sauchyn, D. et S. Kulshreshtha. « Prairies », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, D. Lemmen, F. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éd.), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, pp. 275-328.
- Schaeffer, R., A.S. Szklo, A.F. Pereira de Lucena, B.S. Moreira Cesar Borba, L.P. Pupo Nogueira, F.P. Fleming, A. Troccoli, M. Harrison et M.S. Boulahya. « Energy sector vulnerability to climate change: a review », *Energy*, vol. 38, n° 1, 2012, pp. 1-12.
- Schindler, D.W., W.F. Donahue et J.P. Thompson. « Future water flows and human withdrawals in the Athabasca River », dans *Running Out of Steam? Oil Sands Development and Water Use in the Athabasca River-Watershed: Science and Market Based Solutions*, University of Alberta Environmental Research and Studies Centre et University of Toronto Munk Centre for International Studies, 2007.
- Scott, M.J. et Y.J. Huang. « Effects of climate change on energy use in the United States », dans *Effects of Climate Change on Energy Production and Use in the United States*, 2007.
- Scott, M.J., J.A. Dirks et K.A. Cort. « The value of energy efficiency programs for US residential and commercial buildings in a warmer world », *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 13, n° 4, 2008, pp. 307-339.
- Shrestha, R.R., A.J. Berland, M.A. Schnorbus et A.T. Werner. *Climate change impacts on hydro-climatic regimes in the Peace and Columbia watersheds*, British Columbia, Canada, University of Victoria, Victoria, Colombie-Britannique, 2011.
- Shrestha, R.R., M.A. Schnorbus, A.T. Werner et A.J. Berland. « Modelling spatial and temporal variability of hydrologic impacts of climate change in the Fraser River basin, British Columbia, Canada », *Hydrological Processes*, vol. 26, n° 12, 2012, pp. 1840-1860.
- Smith, C. et G. Levermore. « Designing urban spaces and buildings to improve sustainability and quality of life in a warmer world », *Energy Policy*, vol. 36, n° 12, 2008, pp. 4558-4562.
- Soito, J.L.S. et M.A.V. Freitas. « Amazon and the expansion of hydropower in Brazil: vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n° 6, 2011, pp. 3165-3177.
- Soulé, P.T. et P.A. Knapp. « Radial growth rate increases in naturally occurring ponderosa pine trees: a late-20th century CO₂ fertilization effect? », *The New Phytologist*, vol. 171, 2006, pp. 379-390.
- SRC (Société royale du Canada). *Environmental and health impacts of Canada's oil sands industry*, Groupe d'experts de la Société royale du Canada, Ottawa (Ontario), 2010, 440 p.
- St. George, S.S. « Streamflow in the Winnipeg River basin, Canada: trends, extremes and climate linkages », *Journal of Hydrology*, vol. 332, 2007, pp. 396-411.
- Stantec Consulting Ltd. *Preliminary assessment report, Canadian Beaufort Sea region*, rapport rédigé pour Affaires autochtones et Développement du Nord Canada, Ottawa (Ontario), 2012.
- Statistique Canada. *Énergie électrique produite à partir de combustibles*, CANSIM Tableau 128-0014, 2013, <<http://www5.statcan.gc.ca/cansim/pick-choisir?id=1280014&p2=33&retLang=fr&lang=fr>>.
- Steenberg, R.N., P. Duinker, L. Van Damme et K. Zielke. *Indicators of sustainable forest management in a changing climate*, Conseil canadien des ministres des forêts, Groupe de travail sur les changements climatiques, Groupe chargé de l'analyse technique, 2012.
- Ste-Marie, C., E.A. Nelson, A. Dabros et M.E. Bonneau. « Assisted migration: introduction to a multifaceted concept », *Forestry Chronicle*, vol. 87, n° 6, 2011, pp. 724-730.
- Stothart, P. *Faits et chiffres 2011 : L'industrie minière canadienne*, Association minière du Canada (AMC), 2011.
- Stratos. *Climate change impacts on mining operations and infrastructure*, rapport rédigé pour le Centre for Excellence in Mining Innovation, 2009, <<http://www.miningexcellence.ca>>.
- Stratos. *Climate change and acid rock drainage – risks for the Canadian mining sector*, No. 1.61.7, 2011.
- Stroeve, J.C., V. Kattsov, A. Barrett, M. Serreze, T. Pavlova, M. Holland et W.N. Meier. « Trends in Arctic sea ice extent from CMIP5, CMIP3 and observations », *Geophysical Research Letters*, vol. 39, L16502, 2012, 7 p.
- Sturrock, R.N., S.J. Frankel, A.V. Brown, P.E. Hennon, J.T. Kliejunas, K.J. Lewis, J.J. Worrall et A.J. Woods. « Climate change and forest diseases », *Plant Pathology*, vol. 60, n° 1, 2011, pp. 133-149.
- Trenberth, K. « More knowledge, less certainty », *Nature Reports Climate Change*, vol. 4, 2010, pp. 20-21.

- TRNEE (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie). *Le prix à payer : répercussions économiques du changement climatique pour le Canada*, Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, Ottawa (Ontario), 2011, 172 p., <http://www.aqve.com/sites/default/files/documents/trn_prospritr_climatique_canada.pdf>.
- TRNEE (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie). *Face aux éléments : renforcer la résilience des entreprises au changement climatique (études de cas)*, Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, Ottawa (Ontario), 2012a.
- TRNEE (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie). *Face aux éléments : renforcer la résilience des entreprises au changement climatique (rapport conseil)*, Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, Ottawa (Ontario), 2012b.
- Ürge-Vorsatz, D. et S. Tirado Herrero. « Building synergies between climate change mitigation and energy poverty alleviation », *Energy Policy*, vol. 49, 2012, pp. 83-90.
- Vale. *Voisey's Bay development*, 2013, <<http://www.vbnc.com>>.
- Van Mantgem, P.J., N.L. Stephenson, J.C. Byrne, L.D. Daniels, J.F. Franklin, P.Z. Fulé, M.E. Harmon, A.J. Larson, J.M. Smith, A.H. Taylor et T.T. Veblen. « Widespread increase of tree mortality rates in the western United States », *Science*, vol. 323, n° 5913, 2009, pp. 521-524.
- Ville de Vancouver. *Stanley Park restoration*, Ville de Vancouver 2012, <<http://vancouver.ca/parks-recreation-culture/stanley-park-restoration.aspx>>.
- Wang, G.G., S. Chhin et W.L. Bauerle. « Effect of natural atmospheric CO₂ fertilization suggested by open-grown white spruce in a dry environment », *Global Change Biology*, vol. 12, 2006, pp. 601-610.
- Webster, A., F. Gagnon-Lebrun, C. Desjarlais, J. Nolet, C. Sauvé et S. Uhde. *L'évaluation des avantages et des coûts de l'adaptation aux changements climatiques*, Ouranos, 2008.
- Wilbanks, T.J., P. Romero Lankao, M. Bao, F. Berkhout, S. Cairncross, J.-P. Ceron, M. Kapshe, R. Muir-Wood et R. Zapata-Marti. « Industry, settlement and society », dans *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, contribution du Groupe de travail II au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson (éd.), Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, 2007, pp. 357-390.
- Wilbanks, T.J., V. Bhatt, D.E. Bilello, S.R. Bull, J. Ekmann, W.C. Horak, Y.J. Huang, M.D. Levine, M.J. Sale, D.K. Schmalzer et M.J. Scott. *Effects of climate change on energy production and use in the United States*, rapport rédigé par le U.S. Climate Change Science Program (CCSP) et le Subcommittee on Global Change Research, Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research, Washington (DC), États-Unis, 2008.
- Williamson, T.B., S.J. Colombo, P.N. Duinker, P.A. Gray, R.J. Hennessey, D. Houle, M. Johnston, A.E. Ogden et D.L. Spittlehouse. *Les changements climatiques et les forêts du Canada : des impacts à l'adaptation*, Réseau de gestion durable des forêts et Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Nord, Edmonton (Alberta), 2009.
- WISE (World Information Service on Energy) Uranium Project. *Chronology of major tailings dam failures*, World Information Service on Energy, 2006, <<http://www.wise-uranium.org/mdaf.html>>.
- Wotton, B.M., C.A. Nock et M.D. Flannigan. « Forest fire occurrence and climate change in Canada », *International Journal of Wildland Fire*, vol. 19, 2010, pp. 253-271.
- Xu, T., J. Sathaye, H. Akbari, V. Garg, et S. Tetali. « Quantifying the direct benefits of cool roofs in an urban setting: Reduced cooling energy use and lowered greenhouse gas emissions », *Building and Environment*, vol. 48, n° 1, 2012, pp. 1-6.
- Yao, Y., G.H. Huang et Q. Lin. « Climate change impacts on Ontario wind power resource », *Environmental Systems Research*, 2012, 1:2, <<http://www.environmentalsystemsresearch.com/content/1/1/2>>.
- Zaturecky, I. et I. Chiu. *Alternative wood products from blue-stained mountain pine beetle lumber: non-structural laminated products*, Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria, Colombie-Britannique. Mountain Pine Beetle Initiative Working Paper 2005-07, 2005, 20 p.
- Zmeureanu, R. et G. Renaud. « Estimation of potential impact of climate change on the heating energy use of existing houses », *Energy Policy*, vol. 36, n° 1, 2008, pp. 303-310.
- Zwiers, F.W., M.A. Schnorbus et G.D. Maruszeczka. *Hydrologic impacts of climate change on BC water resources*, Pacific Climate Impacts Consortium et University of Victoria, 2011.