

NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC

Bâtiments et infrastructures publiques de base résilients aux changements climatiques: sommaire de l'état de la pratique et des écarts de connaissances dans l'adaptation aux changements climatiques des bâtiments et des infrastructures publiques de base

Lounis, Zoubir; Makar, Jon; Almansour, Husham; Armstrong, Marianne; Baskaran, Bas; Bénichou, Noureddine; Cusson, Daniel; Kleiner, Yehuda; Lacasse, Michael; Lohmann, Frank; Raki, Laila; Zhang, Jieying; Attar, Ahmed; Bwalya, Alex; Colombo, Andrew; Egorov, Igor; Fathi-Fazi, Reza; Gomaa, Islam; Gwynne, Steven; Jacques, Eric; Kadhom, Bessam; Krys, Dennis; Laouadi, Abdelaziz; Lefebvre, Dominique; Maadani, Omran; Molleti, Sudhakar; Nkinamubanzi, Pierre-Claver; Ozkan, Istemi; Saassouh, Bassem; Trischuk, Ken; van Reenen, David

For the publisher's version, please access the DOI link below./ Pour consulter la version de l'éditeur, utilisez le lien DOI ci-dessous.

Publisher's version / Version de l'éditeur:

<https://doi.org/10.4224/40001998>

Report sommaire sur l'initiative BIPBRCC; no. 2016-2017, 2019

NRC Publications Archive Record / Notice des Archives des publications du CNRC :

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/object/?id=11adac31-cf46-4044-b8a5-54c4075a9c83>

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/voir/objet/?id=11adac31-cf46-4044-b8a5-54c4075a9c83>

Access and use of this website and the material on it are subject to the Terms and Conditions set forth at

<https://nrc-publications.canada.ca/eng/copyright>

READ THESE TERMS AND CONDITIONS CAREFULLY BEFORE USING THIS WEBSITE.

L'accès à ce site Web et l'utilisation de son contenu sont assujettis aux conditions présentées dans le site

<https://publications-cnrc.canada.ca/fra/droits>

LISEZ CES CONDITIONS ATTENTIVEMENT AVANT D'UTILISER CE SITE WEB.

Questions? Contact the NRC Publications Archive team at

PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca. If you wish to email the authors directly, please see the first page of the publication for their contact information.

Vous avez des questions? Nous pouvons vous aider. Pour communiquer directement avec un auteur, consultez la première page de la revue dans laquelle son article a été publié afin de trouver ses coordonnées. Si vous n'arrivez pas à les repérer, communiquez avec nous à PublicationsArchive-ArchivesPublications@nrc-cnrc.gc.ca.

CNRC·NRC

BÂTIMENTS ET INFRASTRUCTURES PUBLIQUES DE BASE RÉSILIENTS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

●●● Sommaire de l'état de la pratique et des écarts de connaissances dans l'adaptation aux changements climatiques des bâtiments et des infrastructures publiques de base pour Infrastructure Canada



Conseil national de
recherches Canada

National Research
Council Canada

Canada

Bâtiments et infrastructures publiques de base résilients aux changements climatiques

Sommaire de l'état de la pratique et des écarts de connaissances dans l'adaptation aux changements climatiques des bâtiments et des infrastructures publiques de base

Parrainage d'Infrastructure Canada
Éditeurs : J. Makar et Z. Lounis

© (2019) Sa Majesté la Reine du chef du Canada,
représentée par le Conseil national de recherches du Canada.

Papier : N° de cat. NR16-236/2018-F
ISBN 978-0-660-27265-8

PDF : N° de cat. NR16-236/2018F-PDF
ISBN 978-0-660-27264-1

CNRC-CONST-56265-F

English version available

CNRC.CANADA.CA   

Table des matières

Auteurs.....	vi
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux.....	vii
Liste des abréviations.....	viii
Sommaire.....	ix
1. Introduction.....	1
1.1 Contexte.....	1
1.2 Objectif et portée.....	2
1.3 Structure du rapport.....	3
2. Situation actuelle.....	5
2.1 Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques.....	5
2.2 Bâtiments et infrastructures publiques de base existants.....	5
2.3 Industrie de la construction.....	6
3. Élaboration de charges climatiques pour les bâtiments et les infrastructures publiques de base.....	7
3.1 Contexte.....	7
3.2 Tendances actuelles du climat canadien.....	7
3.3 Modèles et projections des changements climatiques.....	10
3.4 Inondations.....	11
3.5 Incendies de forêt.....	13
3.6 Écarts de connaissances et besoins en recherche.....	13
4. Bâtiments.....	15
4.1 Contexte.....	15
4.2 Effets climatiques sur les bâtiments.....	15
4.3 Écarts de connaissances et besoins en recherche liés au CNB.....	17
4.3.1 Lacunes dans le contenu du Code du bâtiment.....	17
4.3.2. Besoins des parties intéressées en toiture.....	18
4.3.3. Renforcement de la résilience aux conditions météorologiques extrêmes.....	19
4.4. Écarts de connaissances et besoins en recherche hors des exigences du CNB.....	21

5. Ponts	23
5.1 Contexte	23
5.2 Effets climatiques sur les ponts	23
5.3 Écarts de connaissances et besoins en recherche	26
6. Routes	29
6.1 Contexte	29
6.2 Effets climatiques sur les routes	29
6.3 Écarts de connaissances et besoins en recherche	32
7. Réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées.....	33
7.1 Contexte	33
7.2 Effets climatiques sur les réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées.....	34
7.3 Écarts de connaissance et besoins en recherche	36
8. Réseaux de transport en commun	39
8.1 Contexte	39
8.2 État de la pratique en matière de résilience climatique du transport en commun	40
8.3 Aléas climatiques préoccupants	40
8.4 Besoins des parties intéressées du transport en commun	43
8.5 Écarts de connaissances et besoins en recherche	43
9. Élaboration de codes, de normes et de guides	45
9.1 Introduction	45
9.2 Codes, normes et guides existants intégrant des dispositions relatives aux changements climatiques.....	46
9.3 Codes, normes et guides canadiens servant d'instruments de gestion des risques climatiques.....	46
9.4 Limites et lacunes	47
9.5 Logistique	48
10. Évaluation des risques climatiques pour les BIPB	49
10.1 Contexte	49
10.2 Méthodes actuelles d'évaluation des risques climatiques pour les BIPB	50
10.3 Écarts de connaissances.....	51
11. Analyse coûts-bénéfices du cycle de vie / Analyse des coûts du cycle de vie	55
11.1 Contexte	55
11.2 État des connaissances / État de la pratique	55
11.3 Limites et écarts de connaissances.....	56
11.4 Besoins en recherche.....	57

12. Analyse du cycle de vie.....	59
12.1 Contexte	59
12.2 Modèle d'ACV.....	59
12.3 État de la pratique en matière d'ACV	61
12.4 Écarts de connaissances et besoins en recherche	61
13. Cadre pour le soutien des décisions fondées sur le risque pour les bâtiments et les infrastructures publiques de base résilients aux changements climatiques	63
13.1 Contexte	63
13.2 Écarts de connaissances et limites	64
13.3 Aperçu du cadre de soutien à la décision axé sur le risque pour les bâtiments et les infrastructures publiques de base résilients aux changements climatiques	66
13.3.1 Objectifs	66
13.3.2 Aléas climatiques	66
13.3.3 Adaptation aux changements climatiques fondée sur le risque	67
13.3.4 Analyse du cycle de vie et analyse coûts-bénéfices du cycle de vie	70
13.3.5 Suivi de la performance	71
13.4 Mise en œuvre du cadre de soutien à la décision	71
14. Synthèse des répercussions des changements climatiques et des besoins en recherche	75
14.1 Résumé des effets climatiques sur différents systèmes d'infrastructure	75
14.2 Besoins en recherche.....	78
15. Sommaire et recommandations	81
Remerciements	83
Références bibliographiques.....	85

Auteurs

Zoubir Lounis

Jon Makar

Husham Almansour

Marianne Armstrong

Bas Baskaran

Noureddine Bénichou

Daniel Cusson

Yehuda Kleiner

Michael Lacasse

Frank Lohmann

Laila Raki

Jieying Zhang

Ahmed Attar

Alex Bwalya

Andrew Colombo

Igor Egorov

Reza Fathi-Fazl

Islam Gomaa

Steven Gwynne

Eric Jacques

Bessam Kadhom

Dennis Kryz

Abdelaziz Laouadi

Dominique Lefebvre

Omran Maadani

Sudhakar Molleti

Pierre-Claver Nkinamubanzi

Istemi Ozkan

Bassem Saassouh

Ken Trischuk

David van Reenen

Liste des figures

Figure 1 – Variations observées des températures moyennes annuelles canadiennes et mondiales (en °C) (Shepherd et Zhang, 2017)	8
Figure 2 – Tendances annuelles observées des précipitations : 1950-2009 a) Pluie; b) Neige (les triangles pleins dénotent une tendance statistiquement significative) (Mekis et Vincent, 2011)	9
Figure 3 – Augmentation prévue de la température moyenne annuelle : 2041-2070 (par rapport à 1976-2005) (Ouranos, 2015)	10
Figure 4 – Dommages aux fondations causés par des conditions de sol sec à Ottawa, 2016 (Photo de T. Manning)	18
Figure 5 – Incendie de forêt de Fort McMurray en Alberta, 2016 (Terry Reith, SRC)	20
Figure 6 – Effondrement du pont Bonnybrook à Calgary, en Alberta, 2013 (Bureau de la sécurité des transports du Canada)	25
Figure 7 – Pont endommagé par un embâcle, Torch River au Manitoba, 2017	26
Figure 8 – Route et voie ferrée emportées par les eaux, Peace River Country en C.-B., 2016	30
Figure 9 – Effets d'un drainage inadéquat des eaux pluviales à Toronto, 2013	35
Figure 10 – Train de Metrolinx immobilisé lors des inondations de Toronto en 2013	41
Figure 11 – Rails déformés par une vague de chaleur en Australie, 2013	41
Figure 12 – Étapes d'une ACV (selon ISO 2006b)	60
Figure 13 – Modélisation de l'impact des changements climatiques sur la probabilité de défaillance d'un système	65
Figure 14 – Cadre de soutien à la décision axé sur le risque pour les bâtiments et les infrastructures publiques de base résilients aux changements climatiques	68
Figure 15 – Conception minimale acceptable fondée sur les codes nationaux pour les bâtiments et les ponts résilients aux changements climatiques	69
Figure 16 – Meilleures pratiques en matière de conception des bâtiments et infrastructures publiques de base résilients aux changements climatiques	72
Figure 17 – Gestion des actifs existants pour assurer la conception de bâtiments et infrastructures publiques de base résilients aux changements climatiques	73

Liste des tableaux

Tableau 1 – Impact des changements climatiques sur les bâtiments	16
Tableau 2 – Impacts des changements climatiques sur les ponts	24
Tableau 3 – Impacts des changements climatiques sur les routes (adapté de Meyer et coll., 2014)	31
Tableau 4 – Impacts des changements climatiques sur les réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées	34
Tableau 5 – Impacts des changements climatiques sur le transport en commun sur rail	42
Tableau 6 – Approches proposées pour l'évaluation des risques selon le type de bâtiment et d'infrastructure	51
Tableau 7 – Effets des aléas climatiques sur les bâtiments et les infrastructures	76
Tableau 8 – Évaluation initiale de l'impact des aléas climatiques communs	77
Tableau 9 – Exigences en matière de recherches de l'initiative BIPBRCC	79

Liste des abréviations

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ACBCV	Analyse coûts-bénéfices du cycle de vie
ACCV	Analyse des coûts du cycle de vie
ACTU	Association canadienne du transport urbain
ACV	Analyse du cycle de vie
ANSI	American National Standards Institute
APEGBC	Association of Professionals Engineers and Geoscientists of BC
AREMA	American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials International
ATC	Association des transports du Canada
AWWA	American Water Works Association
BIPB	Bâtiments et infrastructures publiques de base
BIPBRCC	Bâtiments et infrastructures publiques de base résilients aux changements climatiques
CCCPR	Code canadien sur le calcul des ponts routiers
CCMC	Centre canadien des matériaux de construction
CCRA	Climate Change Risk Assessment
CNB	Code national du bâtiment
CNP	Code national de la plomberie
CNPI	Code national de prévention des incendies
CNRC	Conseil national de recherches du Canada
CPC	Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques
CSA	Association canadienne de normalisation
CVIIP	Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques
DDN	Devis directeur national de la construction
ECCC	Environnement et Changement climatique Canada
FHWA	Federal Highway Administration
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ICV	Inventaire du cycle de vie
IDF	Intensité-durée-fréquence
IgCC	International Green Construction Code
INFC	Infrastructure Canada
ISO	Organisation internationale de normalisation
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MCM	Modèle climatique mondial
PIEVC	Public Infrastructure Engineering Vulnerability Committee
SPC	Sécurité publique Canada
SRC	Société Radio-Canada
RCP	Profils représentatifs d'évolution de concentration
RNCan	Ressources naturelles Canada
TTC	Toronto Transit Commission

Sommaire

Les bâtiments, les ponts, les routes, le transport en commun sur rail de même que les réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées du Canada fournissent un abri et de l'eau potable, et permettent le transport des personnes et des marchandises ainsi que la collecte et le traitement des eaux usées. Ils fournissent des services de base essentiels aux Canadiens et sont d'une importance cruciale pour l'économie canadienne et la qualité de vie de la nation. Ces bâtiments et infrastructures publiques de base (BIPB) subissent des effets incertains et variables dans le temps en raison des changements climatiques, et sont soumis à des événements météorologiques extrêmes plus fréquents, comme les inondations. Ces pressions induites par les changements climatiques pourraient éventuellement réduire la sécurité, le rendement en service, la fonctionnalité et la durée de vie des BIPB du Canada. De plus, les BIPB canadiens vieillissent et se détériorent en raison de différents mécanismes de dégradation, ainsi que de pratiques inadéquates d'inspection et d'entretien – des problèmes potentiellement aggravés par les effets des changements climatiques.

L'initiative Bâtiments et infrastructures publiques de base résilients aux changements climatiques (BIPBRCC) a été établie sous forme de partenariat de recherche-développement entre le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) et Infrastructure Canada afin d'élaborer des codes, des normes, des spécifications, des lignes directrices et des outils décisionnels nouveaux et révisés pour rendre les BIPB nouveaux et existants au Canada plus résilients face aux effets des changements climatiques et des événements météorologiques extrêmes. Financée par Infrastructure Canada et gérée par le CNRC, cette initiative réunit des experts de partout au pays. Les secteurs prioritaires de l'initiative comprennent les bâtiments, les ponts, les routes, les réseaux d'eau potable, d'eaux pluviales et d'eaux usées, ainsi que les transports en commun sur rail. L'initiative porte sur la résilience face aux impacts des changements climatiques sur la température, les précipitations, le vent et les événements météorologiques extrêmes, notamment les inondations, les incendies de forêt et le vent extrême, qui peuvent affecter ces types de BIPB partout au pays.

Les six premiers mois des 4,5 années prévues pour l'initiative BIPBRCC ont été consacrés à l'examen des types d'aléas climatiques susceptibles d'affecter les BIPB, à l'identification des pratiques d'avant-garde actuelles pour améliorer la résilience des BIPB face aux changements climatiques, à la définition des écarts de connaissances et des besoins en recherche, ainsi qu'à l'établissement de priorités pour la recherche, le développement et la mobilisation des parties intéressées. Ce rapport présente les résultats de l'initiative, y compris des recommandations concernant les principaux domaines de travail à traiter dans la portée de l'initiative.

L'interaction entre les aléas climatiques et les différents systèmes des BIPB est complexe, et ce ne sont pas tous les aléas climatiques qui affectent tous les BIPB. Les inondations, qui deviennent un danger climatique très coûteux au Canada, constituent une exception, étant susceptibles d'entraîner des dommages matériels graves et des risques pour la santé et la sécurité des personnes dans presque tous les types de BIPB. Les incendies de forêt, bien que rares, sont très dommageables, touchant principalement les bâtiments et les routes urbaines, et ils doivent être traités dans la planification communautaire plutôt que seulement dans les codes du bâtiment et de prévention des incendies.

Divers niveaux de vulnérabilité aux changements climatiques et aux conditions météorologiques extrêmes ont été définis pour les bâtiments, les ponts, les routes, le transport en commun sur rail et les réseaux d'eau potable, d'eaux pluviales et d'eaux usées. Les bâtiments et les ponts ont été jugés vulnérables au plus grand nombre d'aléas climatiques, susceptibles de causer des défaillances fonctionnelles ainsi que des défaillances structurales. Les bâtiments et les ponts sont également régis par des codes nationaux spécifiques qui peuvent servir à traiter de la résilience climatique dans les structures nouvelles et existantes. Les réseaux d'évacuation des eaux pluviales ont été jugés particulièrement sensibles aux inondations soudaines, ce qui pourrait

entraîner des coûts financiers importants. Les routes et les réseaux enfouis d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées ont été jugés plus vulnérables aux aléas climatiques à des points critiques du réseau, plutôt que dans l'ensemble du réseau. Les réseaux de transport en commun sur rail se situaient entre les réseaux routiers et les réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées, et les bâtiments distincts et les ponts, pour ce qui est de la nature de leurs vulnérabilités aux changements climatiques.

Les six premiers mois de l'initiative ont également porté sur l'identification des écarts de connaissances et des besoins en recherche dans les domaines des charges climatiques, de l'évaluation des risques et de la prise de décisions axée sur les risques, de l'évaluation du cycle de vie environnemental et de l'analyse coûts-bénéfices du cycle de vie économique. Tous ces domaines présentent des lacunes importantes à combler. Le présent rapport décrit en détail les besoins particuliers de chaque domaine dans la section appropriée. Un cadre d'aide à la prise de décisions fondée sur les risques pour des BIPB résilients face au climat est proposé afin d'aider les décideurs à respecter les exigences minimales des codes et des normes, à appliquer des lignes directrices de pratiques exemplaires dans les guides et à fournir des outils plus robustes de soutien décisionnel lorsque des niveaux de risque inférieurs ou de performance supérieurs sont attendus.

Enfin, des ateliers à l'intention des parties intéressées ont été organisés dans les domaines des changements climatiques et des codes, des toitures, des réseaux de transport en commun et des inondations. Ces ateliers ont produit des données utiles et ont permis de trouver des partenaires pour de futures collaborations avec les parties intéressées.

D'après les résultats de l'analyse menée au cours des six premiers mois de l'initiative BIPBRCC, il est recommandé que d'importants efforts de recherche et de développement soient axés sur les domaines des bâtiments et ponts résilients aux changements climatiques, des inondations et des incendies de forêt, ainsi que sur les technologies de soutien comme les codes et les guides de conception, et les outils de gestion des biens pour les BIPB existants. De plus, des activités de recherche et de développement ciblées devraient viser notamment les réseaux de transport en commun sur rail, les routes et les réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées.

1. Introduction

1.1 Contexte

Les bâtiments, les ponts, les routes, le transport en commun sur rail et les réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées sont essentiels à l'économie du Canada et à la qualité de vie des Canadiens. Ces bâtiments et infrastructures publiques de base (BIPB) offrent un abri, permettent le transport des personnes et des marchandises, acheminement de l'eau potable, et collectent et traitent les eaux usées. Le fonctionnement continu des BIPB clés est également essentiel pour le secours après une catastrophe.

Les BIPB peuvent subir des effets incertains et variables dans le temps en raison des changements climatiques, notamment en raison de l'augmentation de la température, des précipitations et de la vitesse du vent, ainsi que d'événements météorologiques extrêmes plus fréquents, comme les inondations. Ces effets climatiques peuvent entraîner une augmentation des charges et un taux de détérioration accru, et en conséquence réduire la sécurité, le rendement en service, la fonctionnalité et la durée de vie utile des BIPB nouveaux et existants au Canada. Les changements climatiques pourraient coûter de 21 à 43 milliards de dollars par année au Canada d'ici 2050 (Table ronde nationale sur l'environnement et l'économie, 2011), qui sont des coûts en majeure partie rattachés aux BIPB.

En plus des effets des changements climatiques, les BIPB du Canada vieillissent et se détériorent en raison des effets de divers mécanismes de dégradation, comme la corrosion et la surcharge, ainsi que de pratiques inadéquates d'inspection et d'entretien. Selon le *Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes* de 2016, le tiers des infrastructures publiques de base (IPB) du Canada est dans un état passable, mauvais ou très mauvais. Le coût de réparation et d'entretien des IPB pour les ramener à des niveaux acceptables est estimé à 170 milliards de dollars (*Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes*, 2012). Il existe des variations importantes en matière de déficit infrastructurel au Canada, estimées entre 50 milliards et 570 milliards de dollars (Chambre de commerce du Canada, 2013). Les changements climatiques et les conditions météorologiques extrêmes peuvent accélérer la détérioration des IPB, ce qui accroît la quantité de travaux de réhabilitation et de renouvellement nécessaires.

Un partenariat de recherche et développement a été établi entre le Conseil national de recherches du Canada (CNRC) et Infrastructure Canada (INFC) afin de relever les défis liés aux changements climatiques et de produire les codes, les lignes directrices, les normes et les outils décisionnels fondés sur la science et les faits dont le Canada a besoin pour adapter les BIPB aux changements climatiques. L'initiative Bâtiments et infrastructures publiques de base résilients aux changements climatiques (BIPBRCC), qui découle de ce partenariat, est financée par INFC et gérée par le CNRC, réunissant des experts de partout au Canada. Elle vise à produire des codes, des normes, des guides de pratiques exemplaires, des modèles et des outils à jour pour faire en sorte que les BIPB nouveaux et existants au Canada soient plus résilients aux effets des changements climatiques et des événements météorologiques extrêmes. Ces BIPB résilients comporteront des systèmes et des composants ayant une capacité de résistance, d'absorption, d'adaptation ou de récupération en présence d'événements climatiques défavorables, assortie d'une perte de fonctionnalité minimale et d'une période de récupération qui ne soit pas disproportionnée par rapport à l'intensité des événements défavorables (Lounis et McAllister, 2016).

Cette initiative est essentielle, car le climat (et les charges climatiques connexes) est l'un des facteurs les plus importants qui influent sur la conception et l'exploitation des BIPB canadiens. Les bâtiments sont conçus pour résister à des charges dues à la neige et au vent, et pour protéger les occupants contre la pluie, la chaleur et le froid. Les réseaux d'évacuation des eaux pluviales permettent de drainer les précipitations loin de l'environnement bâti, tandis que les ponts traversent les rivières qui peuvent sortir de leur lit pendant des pluies extrêmes. Les effets climatiques génèrent des charges directes sur les BIPB, ce qui peut accélérer la dégradation (vieillesse) des BIPB existants, rendant nécessaire leur réhabilitation ou leur remplacement.

Les directives antérieures de conception des BIPB tenaient compte de ces effets et présentaient des outils pour faire en sorte que le risque d'effets négatifs des charges climatiques et du vieillissement se maintienne à un niveau acceptable. Ces outils ne tenaient toutefois pas compte des risques associés aux conditions météorologiques extrêmes ni des effets des changements climatiques. Ils portaient plutôt du principe que le climat est stationnaire et faisaient appel à des données historiques du passé.

Comme on le sait très bien maintenant, le climat canadien n'est pas stationnaire; il est plutôt soumis à des changements très importants en raison des effets des émissions de gaz à effet de serre (GES) sur l'environnement terrestre (GIEC, 2014). Le Canada a réagi en élaborant le Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques (Groupe de travail sur l'adaptation et la résilience climatique, 2016), qui représente le plan du Canada pour une croissance économique, accompagnée d'une réduction des émissions et d'une adaptation à un climat changeant. Les premiers ministres du Canada ont convenu de prendre des mesures ambitieuses en vue d'atteindre ou de dépasser la cible canadienne de réduction de 30 % des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 2005, et ils ont également convenu d'élaborer des mesures d'adaptation comme pilier de ce cadre. Le rapport du groupe de travail précise ce qui suit : « *En prenant des mesures visant l'adaptation aux répercussions climatiques actuelles et futures, nous pourrions aider à protéger les Canadiens contre les risques liés aux changements climatiques, renforcer la résilience, réduire les coûts, et veiller à ce que la société prospère dans un climat changeant.* » (Groupe de travail sur l'adaptation et la résilience climatique, 2016).

Les effets attendus des changements climatiques comprennent non seulement des changements au climat de référence du Canada, mais aussi des événements météorologiques extrêmes plus fréquents (Warren et Lemmen, 2014). Les changements au climat de référence peuvent réduire la performance et accélérer le taux de détérioration des BIPB du Canada, mais les événements météorologiques extrêmes, comme les inondations, les incendies de forêt, les pluies verglaçantes, les vents extrêmes et les vagues de chaleur, peuvent causer des défaillances soudaines de la capacité fonctionnelle prévue des BIPB. De récents événements météorologiques extrêmes, comme les incendies de forêt de Fort McMurray en 2016 ou les inondations de 2013 à Calgary et à Toronto, ont causé des dommages de plusieurs milliards de dollars en plus de causer des pertes de vie. Il est donc devenu essentiel d'élaborer des outils permettant d'adapter les BIPB du Canada aux changements climatiques et aux événements météorologiques extrêmes. Ces outils sont nécessaires pour veiller à ce que les BIPB nouveaux et reconstruits soient conçus et aménagés pour faire face aux conditions climatiques futures, et non aux conditions historiques. Ils sont également nécessaires pour faire en sorte que le parc actuel de BIPB, qui vaut des milliards de dollars, soit géré de manière à réduire au minimum les coûts de l'adaptation aux changements climatiques et aux conditions météorologiques extrêmes.

1.2 Objectif et portée

L'initiative BIPBRCC est financée par INFC en vue d'élaborer les codes de conception, les normes, les lignes directrices sur les pratiques exemplaires et les outils décisionnels nécessaires pour adapter les BIPB du Canada afin d'assurer une performance adéquate face aux effets des changements climatiques et des conditions météorologiques extrêmes. Ces travaux seront appuyés par l'expertise du CNRC en matière de recherche et de développement, les plateformes de codes et les réseaux existants de collaboration avec les parties intéressées. Ils seront par ailleurs réalisés avec le soutien de nombreux autres organismes et experts, dont le Groupe CSA et la Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies (CCCBPI).

Les six premiers mois de l'initiative ont porté sur un examen des pratiques actuelles en matière d'adaptation aux changements climatiques, en déterminant les plus récents progrès en la matière, en cernant les lacunes dans la base de savoir existante et en priorisant les secteurs de la recherche sur les bâtiments et les infrastructures pour leur inclusion dans l'initiative. Le présent rapport fournit une synthèse des écarts de connaissances globaux et des besoins en matière de recherche, et cerne les domaines prioritaires d'éventuels travaux durant les quatre années de l'initiative BIPBRCC. Les écarts de connaissances et les besoins en recherche signalés dans le présent document ne relèvent pas tous de la portée de l'initiative BIPBRCC. Ils ont été inclus dans le rapport par souci d'exhaustivité et à titre de référence pour d'autres chercheurs.

1.3 Structure du rapport

Le présent rapport traite du contexte de l'initiative, notamment le Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques, l'état actuel des bâtiments et des infrastructures existants, et l'industrie qui construit et exploite les BIPB. Il aborde ensuite l'impact du climat sur les BIPB et le besoin de charges climatiques futures projetées. Plusieurs sections du rapport abordent les besoins d'adaptation climatique des bâtiments, des ponts, des routes, des réseaux d'eau potable, d'eaux pluviales et d'eaux usées, et des réseaux de transport en commun. L'application de divers outils décisionnels est ensuite décrite, dont les méthodes de gestion des risques, l'analyse coûts-bénéfices du cycle de vie, l'évaluation du cycle de vie environnemental et les cadres décisionnels. Le rapport conclut par une synthèse des impacts des changements climatiques et des besoins en recherche, un résumé et des recommandations.

2. Situation actuelle

2.1 Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques

Le Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques (CPC) est le plan du Canada pour atteindre les objectifs nationaux de réduction des émissions et faire croître l'économie canadienne. Les premiers ministres du Canada ont convenu d'agir pour atteindre ou surpasser les cibles canadiennes de réduction des émissions de GES d'ici 2030. Ils ont également convenu d'élaborer des mesures d'adaptation au climat comme pilier du CPC. Ce dernier comporte quatre piliers :

- i. la tarification de la pollution par le carbone;
- ii. des mesures complémentaires sur le climat;
- iii. l'adaptation et la résilience climatiques; et
- iv. les technologies propres, l'innovation et l'emploi.

L'initiative BIPBRCC est harmonisée au troisième pilier du CPC, l'objectif principal de l'initiative étant d'élaborer des codes, des normes, des guides et des pratiques exemplaires pancanadiens pour des bâtiments et des infrastructures publiques de base résilients aux changements climatiques.

2.2 Bâtiments et infrastructures publiques de base existants

L'adaptation aux changements climatiques des systèmes de BIPB existants présente des défis techniques et économiques supplémentaires qui vont au-delà de ceux de l'adaptation de la construction neuve. Le parc canadien des BIPB existants a été construit dans une grande variété de conditions, en faisant appel à un grand nombre de matériaux et techniques de construction, codes et normes différents. En général, les BIPB plus âgés ont été construits en fonction de lignes directrices de conception moins rigoureuses que celles maintenant en vigueur. De plus, tous les BIPB se détériorent au fil du temps en raison de leur utilisation et des effets environnementaux, ce qui réduit leur capacité de remplir leurs fonctions prévues. Ces deux facteurs combinés font en sorte que les BIPB plus âgés sont généralement plus vulnérables aux charges climatiques que les constructions modernes. Cela est particulièrement vrai lorsque les BIPB n'ont pas été bien entretenus ou modernisés au fil du temps. De plus, l'adaptation des BIPB existants est beaucoup plus problématique que la construction de nouvelles structures en raison du nombre élevé de structures existantes, des coûts d'adaptation et des coûts indirects plus élevés, et des calendriers plus longs qu'impose leur rénovation.

Les bâtiments canadiens appartiennent à des particuliers, à des entreprises et à différents ordres de gouvernement. Ils englobent autant des petites maisons unifamiliales que des tours d'habitation, des tours de bureaux et de grands complexes immobiliers. Les bâtiments sont généralement entretenus par leurs propriétaires, mais les niveaux d'entretien varient. Les propriétaires de grands parcs immobiliers utilisent habituellement des systèmes de gestion des biens et de gestion immobilière pour assurer l'exploitation optimale de leurs biens.

Les gouvernements fédéral, provinciaux, territoriaux et municipaux du Canada sont propriétaires des infrastructures publiques de base du pays qui, aux fins de l'initiative BIPBRCC, se définissent comme étant des routes, des ponts, des réseaux d'eau potable, d'eaux pluviales et d'eaux usées, et des réseaux de transport en commun. Tel que mentionné précédemment, le *Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes* de 2016 indique que le tiers des infrastructures municipales du Canada sont dans un état passable, mauvais ou très mauvais, avec un risque croissant de perturbation des services. Les besoins de renouvellement et de réhabilitation sont estimés à 170 milliards de dollars, un montant qui devrait augmenter en raison des

changements climatiques. La plupart des propriétaires d'infrastructures utilisent également des systèmes de gestion des biens, mais comme on peut le constater dans le pourcentage d'infrastructures en besoin d'attention, le niveau de gestion et la quantité de ressources disponibles peuvent varier considérablement selon la municipalité. Dans la plupart des cas, les petites collectivités et les collectivités éloignées disposent de moins de ressources que les grandes municipalités pour appuyer leur processus décisionnel et mettre en œuvre des pratiques efficaces de gestion des biens.

Convaincre les propriétaires de BIPB d'adapter leurs biens aux changements climatiques exige de produire l'information nécessaire pour démontrer que le risque de défaillance de leurs biens augmentera à l'avenir en raison des changements climatiques. Ces renseignements doivent être disponibles dans des formats faciles à intégrer aux stratégies existantes de gestion des actifs et des risques. De plus, ils doivent tenir compte des coûts socioéconomiques indirects plus vastes découlant de la détérioration ou de la défaillance des systèmes de BIPB. L'inclusion de ces coûts est particulièrement importante dans le cas des IPB, pour lesquelles les coûts indirects d'une défaillance du système seront probablement beaucoup plus élevés que les coûts directs (c.-à-d. coûts de réhabilitation et de remplacement).

2.3 Industrie de la construction

Les nouveaux BIPB sont construits par l'industrie de la construction, qui évolue dans un environnement industriel et réglementaire complexe. Les approches visant à s'assurer que les nouveaux BIPB sont pleinement adaptés aux changements climatiques doivent tenir compte de ce contexte. La construction est une industrie complexe de services et de fabrication qui comporte des milliers de composantes différentes intégrées à des produits et systèmes par un grand nombre de travailleurs, sur le chantier et à l'extérieur. La sécurité de base, la santé, l'accessibilité, l'entretien et la rénovation, l'efficacité énergétique et les caractéristiques de protection des BIPB sont des aspects pris en compte dans les codes, les normes, les spécifications et les guides de construction. Toutefois, la construction est principalement une activité de marché, dont la qualité des produits découle de l'interaction entre les coûts, le temps et la disponibilité des matériaux, des compétences et des connaissances. Les provinces et territoires réglementent la construction des BIPB, tandis que les municipalités inspectent et appliquent généralement les règlements. Le gouvernement fédéral fournit un soutien pour faire appliquer les normes nationales. Ces différents niveaux de gouvernement constituent également une présence considérable à titre d'organismes de réglementation, d'arbitres de grief, de bailleurs de fonds, de facilitateurs et de propriétaires de BIPB.

Le manque de capacité fait en sorte que de nombreuses entreprises de construction éprouvent de la difficulté à innover ou à assimiler de nouvelles informations. Par conséquent, les principaux instruments employés pour influencer les pratiques de l'industrie de la construction sont les codes du bâtiment et des ponts, les normes ainsi que les lignes directrices publiés par le gouvernement, qui énoncent les exigences minimales en matière de performance attendue. Parmi les autres instruments de politique efficaces dans l'industrie de la construction, mentionnons l'éducation et la formation, les programmes d'incitatifs, les dispositions d'assurance et de garantie, ainsi que les obligations et responsabilités professionnelles.

La complexité de l'industrie se traduit par un risque considérable associé à la construction d'un BIPB nouveau, correspondant à la possibilité que la structure n'ait pas la performance prévue. Le risque pendant et immédiatement après la construction est géré par une grande variété d'instruments. Il est souvent essentiel de déterminer si une structure a été construite ou non conformément aux codes et normes applicables pour établir la responsabilité lorsque quelque chose tourne mal, puisque les codes de conception, comme les codes du bâtiment provinciaux, régissent la performance minimale acceptable. Compte tenu de la nature de l'industrie, les modifications aux codes, aux normes et aux lignes directrices semblent présenter une approche efficace pour s'assurer que les systèmes de BIPB nouveaux sont adaptés aux changements climatiques.

3. Élaboration de charges climatiques pour les bâtiments et les infrastructures publiques de base

3.1 Contexte

Les méthodes actuelles de conception, d'évaluation et de réhabilitation des systèmes de BIPB au Canada font appel à des charges climatiques dérivées des données climatiques historiques. Dans tous les cas, ces méthodes présument que le climat est stationnaire, au lieu d'examiner les tendances des données antérieures ou de projeter son éventuelle évolution selon différents scénarios pour les niveaux de concentrations de GES. La science des changements climatiques en est maintenant à un point où nous pouvons prédire certaines données et charges climatiques futures ainsi que les incertitudes qui y sont liées, ce qui permet de commencer à tenir compte des charges futures pour la conception des BIPB. Cette évolution des méthodes de conception est essentielle, car la plupart des BIPB ont des durées de vie utile de 50 à 150 ans ou plus, une période assez longue pour que les structures connaissent des conditions climatiques très différentes de celles de leur époque de construction.

De plus, les méthodes de conception actuelles manquent de cohérence dans leur traitement des événements météorologiques extrêmes, car elles peuvent tout simplement ne pas en tenir compte, se fonder sur des données historiques (en ignorant les tendances climatiques futures) ou faire appel à une période de retour relativement courte comparativement à ce qui pourrait être souhaitable. Les méthodes actuelles sont principalement conçues pour les constructions neuves et supposent que la capacité de la structure demeurera constante tout au long de sa durée de vie. La dégradation graduelle des structures existantes au fil du temps ajoute un autre degré d'incertitude à l'évaluation de leur performance et n'est généralement pas prise en compte dans les méthodes de conception actuelles.

Un facteur clé de la modification des méthodes existantes pour intégrer la résilience climatique consiste à comprendre comment les charges de référence et les charges climatiques extrêmes devraient changer au fil des années. Une fois cette information connue, la prise en compte de la résilience climatique consiste à d'abord comprendre comment les charges affecteront les bâtiments et les infrastructures, et ensuite assurer le niveau de résilience ou de robustesse requis dans la conception des composants et des systèmes des BIPB pour maintenir un niveau acceptable de risque de défaillance pendant leur durée de vie.

Cette section du rapport décrit les tendances climatiques actuelles et projetées, et traite des lacunes dans les pratiques et les modèles existants qu'il faut combler afin d'assurer le niveau d'exactitude prévisionnelle nécessaire pour développer la résilience climatique des BIPB. Outre les sources publiées, les résultats d'une consultation d'experts tenue au CNRC (Attar et Lounis, 2017) ont servi à analyser les écarts de connaissances actuels sur les changements climatiques en lien avec la conception et la durée de vie utile des BIPB.

3.2 Tendances actuelles du climat canadien

Alors que les méthodes actuelles de conception des BIPB reposent sur des conditions climatiques historiques et stationnaires, un examen des données existantes démontre que le climat canadien évolue depuis au moins les années 1940. Comme pour les données mondiales et les modèles prévisionnels, les tendances les plus évidentes ont été observées dans les changements de température. Par ailleurs, les données sur les précipitations affichent également des tendances à long terme.

Les températures moyennes au Canada ont déjà augmenté de 1,6 °C depuis 1948 (Groupe de travail sur l'adaptation et la résilience climatique, 2016), ce qui représente un réchauffement correspondant à environ le double du taux mondial (figure 1). Qui plus est, le réchauffement des régions de l'Arctique canadien est supérieur au taux national. Bien que le réchauffement ait été observé uniformément à peu près partout au Canada, des tendances de réchauffement plus fortes ont été relevées dans le Nord et l'Ouest, alors que le réchauffement suit un rythme plus lent le long de la côte Atlantique (Shepherd et Zhang, 2017).

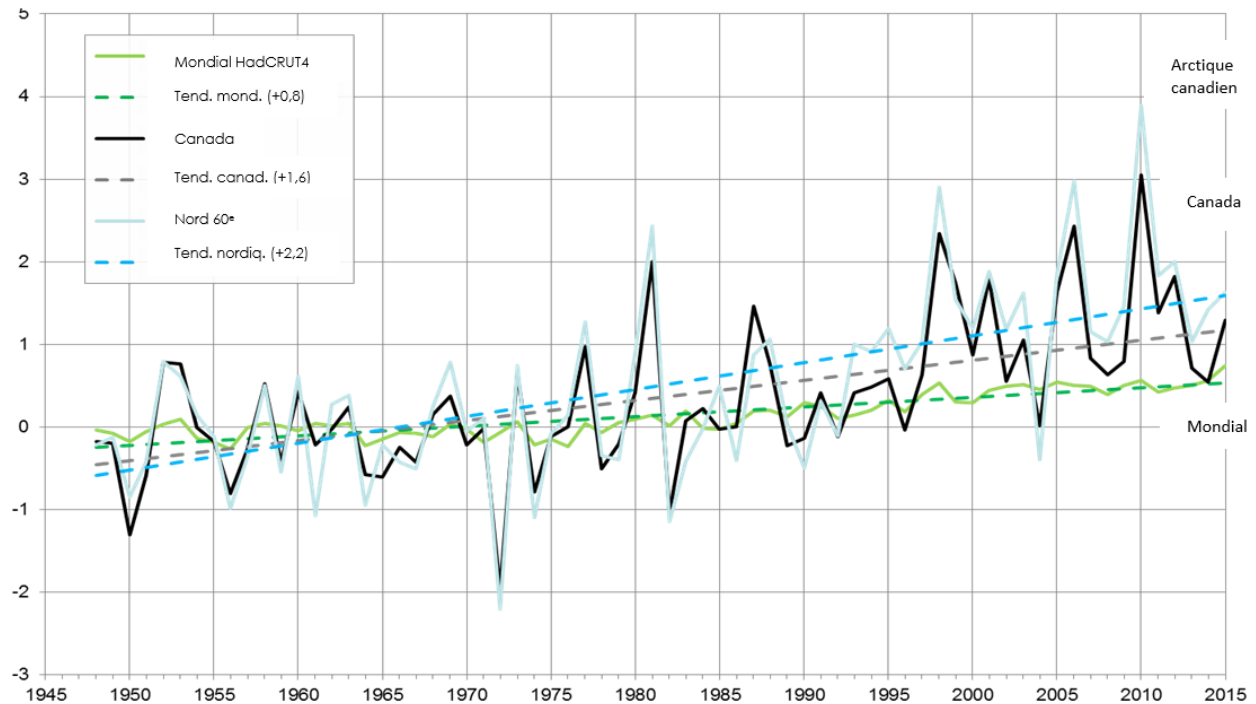


Figure 1 – Variations observées des températures moyennes annuelles canadiennes et mondiales (en °C) (Shepherd et Zhang, 2017)¹

Comme l'air chaud peut emprisonner plus d'humidité, le nombre d'événements de précipitations pourrait augmenter parallèlement à la hausse des températures locales. Cet effet est toutefois tributaire de la géographie locale, car des phénomènes comme l'ombre pluviométrique pourraient empêcher une augmentation des précipitations dans des régions comme le versant est des Rocheuses. En général, le Canada est devenu plus humide au cours des dernières décennies (Mekis et Vincent, 2011), avec une augmentation des précipitations annuelles d'environ 16 % entre 1950 et 2009. Ce changement correspond à une augmentation des précipitations de pluie d'environ 13 % et de neige d'environ 4 %. Le degré de changement varie cependant selon les régions (figure 2), alors que les précipitations de pluie augmentent et que celles de neige diminuent dans la plupart des régions du sud du Canada, conséquence prévisible du réchauffement des températures. Il convient de souligner que même si les niveaux globaux des précipitations ont augmenté dans la plupart des régions, des tendances régionales en matière de sécheresse ont également été perceptibles, particulièrement dans les provinces de l'Ouest.

¹ Figure utilisée avec la permission du Ministre de l'Environnement et du Changement climatique; © Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le Ministre de l'Environnement et du Changement climatique, 2019.

Les tendances des vents ne sont pas aussi évidentes au fil du temps. Bien qu'il soit possible de définir les types d'événements qui créent des aléas liés au vent dans différentes régions du pays (Vickery, 2017), les données manquent à ce jour pour déterminer si les événements de vents violents ou de dommages connexes ont augmenté au fil du temps. Les meilleures données historiques semblent s'appliquer aux ouragans le long de la côte Atlantique du Canada, mais même ces données ne permettent pas de dégager clairement des tendances historiques. Les données historiques montrent toutefois que la fréquence et l'intensité des tempêtes extratropicales d'hiver ont augmenté dans le nord du Canada (latitudes supérieures à 56 degrés) et les provinces des Maritimes, mais qu'elles ont diminué dans le reste du sud du Canada (Wang, Swail et coll., 2006).

Le manque de connaissances sur la modification des schémas de vents correspond à un manque général de compréhension de la nature des aléas liés au vent (Vickery, 2017). On sait que les aléas liés au vent dans le sud de l'Ontario, à Winnipeg et à Montréal sont dominés par des orages, tandis que les aléas liés au vent à Vancouver et la majeure partie de la côte est sont dominés par des tempêtes extratropicales originaires de la mer. Les ouragans contribuent aux aléas liés au vent pour les régions côtières du Nouveau-Brunswick et de la Nouvelle-Écosse, alors que les tornades sont un phénomène important dans les Prairies et en Ontario.

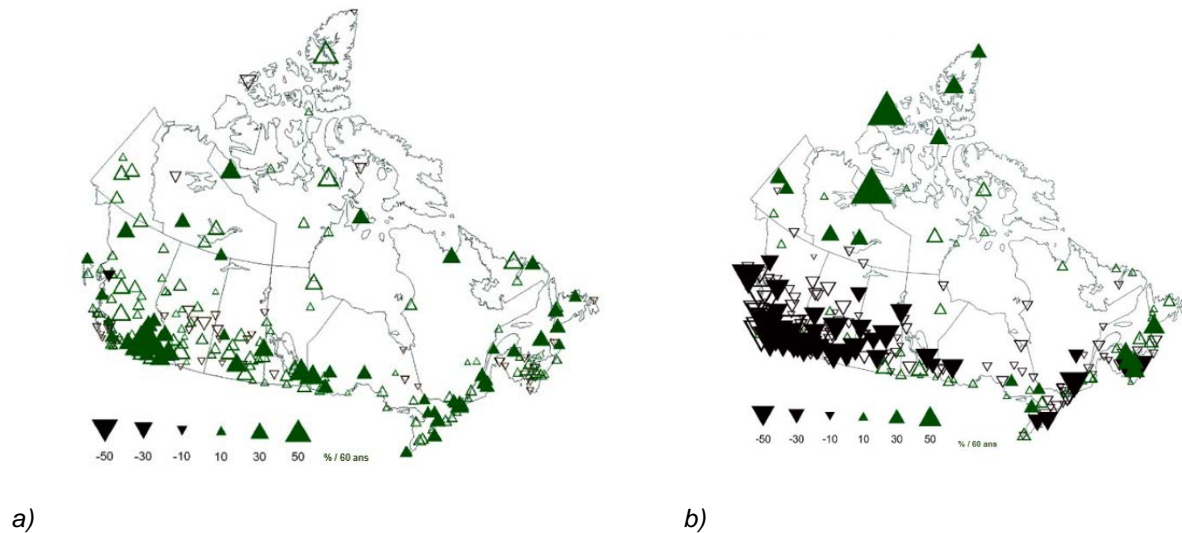


Figure 2 – Tendances annuelles observées des précipitations : 1950-2009 a) Pluie; b) Neige (les triangles pleins dénotent une tendance statistiquement significative) (Mekis et Vincent, 2011)²

² Figure utilisée avec la permission du Ministre de l'Environnement et du Changement climatique; © Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le Ministre de l'Environnement et du Changement climatique, 2019.

3.3 Modèles et projections des changements climatiques

La modélisation climatique est un processus informatique intensif qui examine un système mondial atmosphère-glace-océan-terre couplé. Pour cette modélisation, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) adoptait en 2014 quatre profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) aux fins de son cinquième rapport d'évaluation (GIEC, 2014). Les RCP reposent sur différents niveaux de concentrations de GES plutôt que sur les émissions, mais dépendent des quantités d'émissions entre 2014 et 2100. Le scénario d'émissions les plus élevées donne un réchauffement planétaire de 2,6 °C à 4,8 °C au cours de cette période, tandis que le plus faible produit un réchauffement de 0,3 °C à 1,7 °C. Les scénarios des niveaux d'émissions moyen-faible et moyen-élevé correspondent à un réchauffement planétaire de 1,1 °C à 2,6 °C et de 1,4 °C à 3,1 °C, respectivement.

Les températures moyennes au Canada devraient augmenter de 1,5 °C à 4,5 °C d'ici 2070, selon les résultats combinés du modèle international qui ont tenu compte des scénarios d'émissions de GES faibles et très élevés (figure 3). Les changements de température ne seront toutefois pas uniformes d'une région à l'autre (Collins, Knutti et coll., 2013), la région de l'Arctique devant être celle qui se réchauffera le plus. On s'attend également à des variations saisonnières dans les schémas de réchauffement, les plus fortes augmentations de température de l'hiver survenant dans le nord du Canada, et celles de l'été, dans le sud du Canada (Warren et Lemmen, 2014). La plupart des endroits connaîtront des vagues de chaleur plus fréquentes et moins de froids extrêmes. Les extrêmes de chaleur dureront aussi plus longtemps, avec des températures plus élevées que celles enregistrées précédemment.

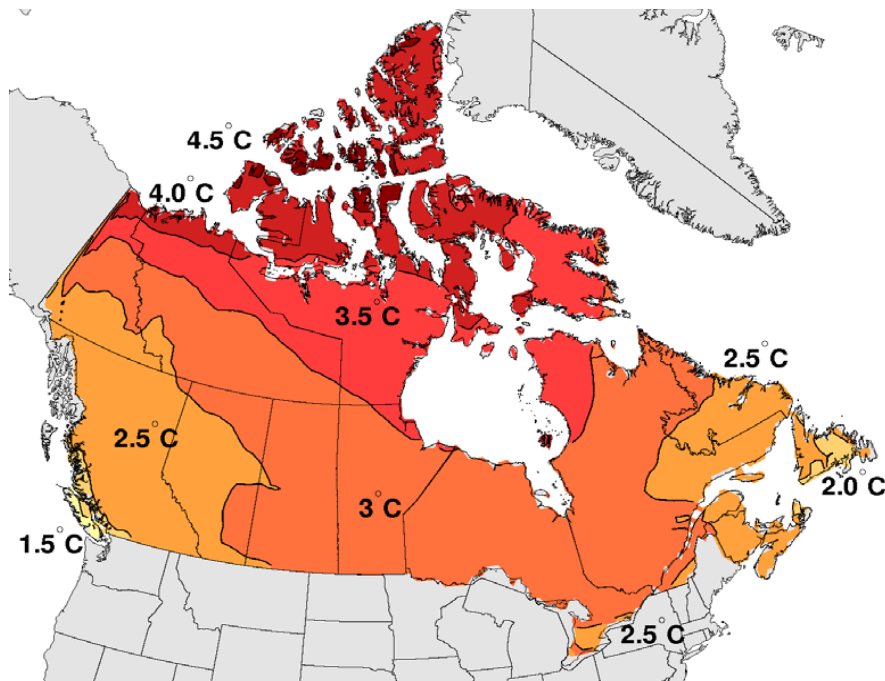


Figure 3 – Augmentation prévue de la température moyenne annuelle : 2041-2070 (par rapport à 1976-2005) (Ouranos, 2015³)

³ Figure utilisée avec la permission d'Ouranos.

Le degré de certitude est moindre relativement à l'impact de la hausse des températures sur les pluies, les schémas de vents, l'élévation du niveau de la mer et d'autres phénomènes météorologiques (Zwiers, 2017). Les projections de variation des précipitations sont généralement moins robustes que celles sur les changements de température, car les modèles climatiques varient davantage (Warren et Lemmen, 2014; Zwiers, 2017). Il est toutefois très probable que les précipitations mondiales augmenteront parallèlement à la hausse de la température moyenne de la surface planétaire à long terme (Collins, Knutti et coll., 2013). L'examen des données canadiennes révèle que des variations des extrêmes de précipitations quotidiennes au cours des 50 à 60 dernières années ressortent des observations à l'échelle nationale (Zwiers, 2017). Toutefois, ces changements ne devraient pas être décelables de façon fiable dans les relevés de stations individuelles en raison des limites de mesure et du modèle climatique. Une hausse générale des précipitations est attendue, car la quantité d'eau qui peut être présente dans l'atmosphère augmente avec un réchauffement accru, mais il est beaucoup plus difficile de quantifier exactement l'augmentation annuelle à un endroit donné. Les événements de précipitations extrêmes sont encore plus difficiles à prévoir, même si leur fréquence devrait également augmenter.

On dispose encore moins d'information à propos de l'impact des changements climatiques sur la vitesse des vents et la fréquence des événements extrêmes de vent (Zwiers, 2017). Il y a moins d'études dans ce domaine et la plupart des recherches ont porté sur les changements dans la fréquence et la gravité des cyclones tropicaux, comme les ouragans ou les moussons. Le consensus actuel du GIEC en ce qui concerne les cyclones tropicaux est qu'il est probable que leur fréquence globale diminuera ou restera constante, mais que les moyennes de leur vitesse maximale de vent et de leur taux de précipitations augmenteront (GIEC, 2014). Le degré de confiance est cependant faible pour les prédictions de cyclones tropicaux dans certaines régions, dont l'Atlantique Nord.

Très peu de travaux ont été effectués pour tenter de déterminer si la fréquence et la gravité des vents extrêmes attribuables aux orages et aux tornades seront touchées par les changements climatiques. En fait, le GIEC ne fait aucune allusion aux tornades. Il est probable que la région du Canada touchée par des orages et des tornades intenses s'étendra vers le nord (Vickery, 2017) avec le réchauffement climatique, mais cette hypothèse n'a pas été mise à l'épreuve.

3.4 Inondations

Les changements dans la fréquence et l'intensité des inondations constituent l'un des principaux risques météorologiques extrêmes liés aux changements climatiques. Des inondations peuvent se produire en raison d'orages intenses locaux, de la fonte rapide des neiges, d'embâcles sur les cours d'eau, d'ondes de tempête et de la hausse du niveau des océans. Globalement, les inondations représentent une importante cause de pertes économiques et un potentiel élevé de risque pour la sécurité des Canadiens. En 2013, les inondations survenues à Toronto et à Calgary ont touché un grand nombre de personnes, mais certaines collectivités des Premières Nations et des collectivités éloignées subissent souvent des inondations graves, ce qui occasionne ou aggrave de sérieux problèmes de logement. De plus, la conception actuelle des infrastructures suppose un climat stationnaire, ce qui peut entraîner une sous-estimation des précipitations extrêmes, du risque d'inondation et du risque de défaillance des systèmes d'infrastructure (Cheng et AghaKouchak, 2014). De nouvelles mesures sont donc nécessaires face aux risques d'inondation afin de veiller à ce que les réseaux d'évacuation puissent aider à gérer les risques actuels et futurs d'inondation.

Les principaux éléments de la conception de l'infrastructure de drainage comprennent les courbes d'intensité-durée-fréquence (IDF) des précipitations, qui servent à estimer les taux de ruissellement de pointe des eaux pluviales, le coefficient de ruissellement (C), qui représente la capacité d'absorption d'une partie de la pluie par une surface de réception des précipitations, et des hyétogrammes d'orages théoriques, qui servent à définir la répartition temporelle des précipitations durant les simulations utilisées dans la conception des bassins et des ouvrages de drainage à grande échelle. Dans la pratique actuelle, tous ces éléments sont calculés ou estimés en fonction des données historiques et supposent un climat stationnaire. Dans le cas des inondations côtières, l'information sur l'élévation du niveau des océans et la fréquence et l'intensité des tempêtes côtières est essentielle. L'augmentation du niveau des océans peut également accroître la vulnérabilité aux tsunamis et aux marées très élevées, ce qui nécessitera des évaluations spéciales.

La plupart des recherches visant à examiner les effets des changements climatiques sur les inondations ont porté sur les courbes IDF. Les résultats prévoient qu'en raison de l'effet des températures plus chaudes, il y aura plus de vapeur d'eau dans l'atmosphère, avec des précipitations intenses et des inondations qui devraient être plus fréquentes et plus graves. Les courbes IDF qui en résulteront auront des intensités plus fortes et une périodicité plus courte que celles des courbes actuellement utilisées (Cheng et AghaKouchak, 2014; Kuo, Gan et coll., 2015). Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) fournit des courbes IDF standard pour plus de 500 stations climatiques actives et inactives partout au pays (Environnement et Changement climatique Canada, 2017). ECCC offre également un outil gratuit pour l'élaboration de courbes IDF qui tiennent compte des effets des changements climatiques. Les résultats peuvent être obtenus pour une période future jusqu'à l'année 2100, selon 24 modèles climatiques mondiaux (MCM) qui simulent diverses conditions climatiques en fonction des données locales sur les précipitations et trois scénarios climatiques futurs allant d'une gravité faible à élevée. Les utilisateurs peuvent produire des résultats pour les stations pluviométriques d'ECCC préconfigurées ou pour des stations pluviométriques créées par l'utilisateur. Le ministère des Transports de l'Ontario et le ministère des Richesses naturelles et des Forêts de l'Ontario fournissent également des outils IDF qui tiennent compte des changements climatiques. La valeur du coefficient de ruissellement C n'est habituellement pas touchée par les changements climatiques, mais elle changera au fil du temps en raison de la densification urbaine. Les effets des changements climatiques sur les hyétogrammes d'orages théoriques ne semblent pas avoir été abordés par des organismes gouvernementaux à ce jour.

L'état de préparation aux inondations n'a connu que des améliorations limitées au cours des 20 dernières années. Toutefois, le gouvernement du Canada a engagé une importante initiative par l'entremise de Ressources naturelles Canada (RNC) et de Sécurité publique Canada (SPC) pour traiter des problèmes d'inondation (Sécurité publique Canada, 2017). La série de guides d'orientation fédéraux sur la cartographie des plaines inondables, y compris le nouveau Cadre fédéral de la cartographie des plaines inondables, vise à remédier à bon nombre des lacunes existantes du savoir et à aborder l'atténuation des inondations au Canada. Les guides d'orientation prévus qui feront partie du Cadre fédéral de la cartographie des plaines inondables comprennent des travaux sur la vulnérabilité des bâtiments et des études de cas sur les changements climatiques. Les activités liées aux inondations dans le cadre de l'initiative BIPBRCC seront coordonnées avec RNC et SPC.

3.5 Incendies de forêt

Un bon nombre de publications ont été produites à propos des impacts des changements climatiques sur les incendies de forêt dans le contexte canadien. Le Conseil canadien des ministres des forêts a résumé comme suit les impacts des changements climatiques qui devraient avoir une incidence sur les risques liés aux incendies de forêt dans l'avenir (Groupe de travail sur la gestion des feux de forêt, 2016) :

- hausse des températures;
- déclin de l'humidité du sol;
- augmentation des conditions arides;
- accumulation des combustibles végétaux permettant et entretenant les incendies;
- hausse de la présence d'arbres et de plantes de prairie résistants à la sécheresse, qui sont plus propices aux incendies; et
- diminution de la disponibilité de l'eau.

Ces impacts combinés devraient augmenter la durée des saisons d'incendie, le nombre et le risque d'incendies de forêt dans des régions qui n'ont pas connu d'importantes menaces de ce genre jusqu'à maintenant. L'occurrence des feux et la superficie brûlée devraient toutes deux augmenter considérablement au Canada en raison de l'évolution des conditions climatiques. Ainsi, les estimations nationales prévoient une augmentation de 18 % des incendies causés par l'humain et par la foudre d'ici 2050, et de 50 % d'ici 2100; les estimations régionales prévoient qu'à la fin du 21^e siècle en Ontario, les incendies causés par l'humain auront augmenté de 50 %, et que les incendies causés par la foudre en Alberta auront pour leur part augmenté de 80 % (Sandick, Kovacs et coll., 2017).

3.6 Écarts de connaissances et besoins en recherche

L'adaptation des BIPB pour améliorer leur résilience climatique nécessite des renseignements fiables actuels et futurs sur les températures, les précipitations et les charges dues au vent. Dans le cas de la température, il faut connaître non seulement le comportement de référence, mais aussi l'information sur les extrêmes, le nombre de jours de chauffage ou de refroidissement (lorsque le chauffage ou la climatisation est nécessaire) et le comportement de gel-dégel. Les valeurs annuelles des précipitations de 15 minutes et de celles d'une journée sont importantes, mais l'information sur l'IDF des pluies l'est tout autant, tout comme les charges dues à la neige prévues pour différentes périodicités. Il faut connaître les vitesses, les pressions et les durées des tempêtes de vent, mais aussi les aléas réels que présentent ces tempêtes. Dans certaines applications, la probabilité de foudroiement est également une donnée nécessaire.

L'examen des connaissances actuelles des tendances climatiques et des charges climatiques connexes en lien avec les BIPB, présenté dans cette section du rapport, a révélé des écarts de connaissances importants. Bien que les variations de température par rapport à la référence puissent être estimées, les variations des extrêmes de températures, des taux et des extrêmes de précipitation, ainsi que des vitesses et des extrêmes de vent, ne sont pas bien comprises. Il faudra donc mener d'importantes recherches sur le comportement climatique futur pour produire des BIPB résilients aux changements climatiques.

Voici quelques recommandations spécifiques concernant la compréhension de l'évolution des charges climatiques :

- Examiner et mettre à jour les données climatiques historiques du Code national du bâtiment (CNB) (Commission canadienne des codes de bâtiment et de prévention des incendies, 2015) et du Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CCCPR) (Groupe CSA, 2014) selon le postulat de stationnarité.
- Élaborer pour le CNB et le CCCPR de nouvelles données climatiques tenant compte des changements climatiques et des conditions météorologiques extrêmes, y compris les variations régionales des changements climatiques.

- Élaborer de nouvelles données climatiques pour d'autres systèmes de IPB (routes, réseau d'alimentation en eau potable/d'évacuation des eaux usées et transport en commun) qui tiennent compte des changements climatiques et des conditions météorologiques extrêmes, y compris les variations régionales des changements climatiques.
- Poursuivre les travaux d'analyse statistique des données climatiques historiques (température, pluie, glace, neige et vent) afin de cerner des tendances, comme point de départ pour mieux comprendre les projections dans l'avenir. Évaluer les données sur le vent par type d'événements (tempêtes synoptiques, orages, tornades et ouragans) pour déterminer plus précisément les risques.
- Poursuivre la recherche sur la réduction d'échelle des résultats des modèles climatiques mondiaux dans le but d'extraire de l'information utile sur les références climatiques et les événements météorologiques extrêmes à un niveau plus local (échelles spatiales et temporelles plus fines).
- Effectuer des recherches sur les limites de l'approche des aléas uniformes dans la spécification des données climatiques et examiner l'élaboration de l'approche des risques uniformes comme possible solution de rechange.
- Effectuer des recherches sur la modélisation des répercussions des changements climatiques sur les précipitations et le vent.
- Élaborer des outils et des protocoles normalisés pour l'application de modèles climatiques non stationnaires à la prévision de données climatiques futures, y compris des courbes IDF.
- Élaborer des outils et des protocoles normalisés pour tenir compte des changements climatiques dans l'élaboration d'orages théoriques et d'hyétogrammes.
- Examiner l'augmentation à long terme des coefficients de ruissellement et des facteurs C, et élaborer des méthodes d'intégration de cette augmentation à la procédure de conception.
- Examiner et mettre à jour les cartes des aléas d'inondation pour tenir compte des effets des changements climatiques et des conditions météorologiques extrêmes dans la détermination de l'étendue des plaines inondables, et réviser les définitions des niveaux d'inondation pour différentes fréquences d'occurrence.
- Réviser les cartes des inondations côtières afin d'y inclure l'impact de l'évolution du niveau de la mer sur différents types de risque d'inondation.
- Réexaminer les charges prévues des ondes de tempête et des tsunamis sur les infrastructures et bâtiments côtiers en fonction des hausses du niveau de la mer et de l'intensification des tempêtes.
- Élaborer et modifier des outils pour tenir compte des incertitudes dans les émissions de GES et des scénarios RCP dans un modèle probabiliste qui peut être intégré aux modèles climatiques canadiens à moindre échelle et aux prédictions locales des changements climatiques.

4. Bâtiments

4.1 Contexte

Les bâtiments forment le plus grand groupe de structures construites au Canada. Le Canada compte actuellement plus de 14 millions de ménages, nombre qui devrait augmenter de 3 millions au cours des 20 prochaines années. Bien qu'un pourcentage croissant de Canadiens vivent dans de grands immeubles d'habitation et de copropriétés, la plupart habitent dans des maisons unifamiliales ou multifamiliales. Plus de 15 % de toutes les maisons au Canada ont été construites avant 1946, et environ la moitié ont été construites avant 1981 (Statistique Canada, 2011). De même, plus de la moitié des quelque 500 milliers de bâtiments commerciaux et institutionnels du Canada ont été construits avant 1980, avec plus d'un quart construits avant 1960 (Office de l'efficacité énergétique, RNCAN, 2013).

La construction de bâtiments au Canada est régie par les codes du bâtiment provinciaux et territoriaux, eux-mêmes fondés sur le Code national du bâtiment (CNB) (Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies, 2015), publié par le CNRC. Le CNRC publie également des codes nationaux de prévention des incendies (CNPI) et de la plomberie (CNP) distincts. Ces codes modèles visent à assurer la sécurité des Canadiens au moyen d'exigences minimales acceptables pour la conception de bâtiments. Le CNB fait appel à des méthodes de fiabilité et des approches aux états limites, ce qui permet de s'assurer que l'évaluation des risques et leur atténuation font partie intégrante de son processus d'élaboration.

Les éditions courantes (2015) et antérieures du CNB reposent sur des données et des charges climatiques historiques et stationnaires. La mise à jour des pratiques de conception pour tenir compte des effets des changements climatiques et des conditions météorologiques extrêmes est donc essentielle à la création de nouveaux bâtiments résilients aux changements climatiques. Toutefois, d'autres outils sont nécessaires pour appuyer l'évaluation des bâtiments existants en matière de résilience climatique et pour s'assurer que les travaux de rénovation de ce parc existant seront aussi résilients aux changements climatiques.

Cette section du rapport examine les facteurs climatiques qui influent sur la performance du bâtiment. Elle décrit également les écarts de connaissances et le travail requis pour concevoir des bâtiments résilients aux changements climatiques et évaluer la résilience des bâtiments existants.

4.2 Effets climatiques sur les bâtiments

Le climat affecte les bâtiments de différentes façons. Certaines charges climatiques (vents, charge due à la neige, incendie, inondation) peuvent causer de graves dommages, des risques pour la sécurité des personnes et la perte immédiate du bâtiment. D'autres charges climatiques (humidité relative, pluies, gel et dégel) peuvent causer une détérioration du bâtiment au fil du temps, aboutissant éventuellement à des dommages importants. D'autres charges climatiques encore ont une incidence sur le confort des occupants ou sur l'efficacité des systèmes du bâtiment. L'édition actuelle (2015) du CNB comprend des données climatiques de calcul (annexe C, Tableau C-2) pour les températures de janvier et de juillet, les degrés-jours de chauffage, la pluie, les précipitations totales, l'indice d'humidité, la pression de la pluie poussée par le vent, les charges dues à la neige et les pressions du vent. Les données sont fondées sur les tendances historiques et reposent sur l'hypothèse d'un climat stationnaire.

On prévoit que les changements climatiques et les conditions météorologiques extrêmes auront une incidence sur toutes ces données climatiques de calcul et les charges qui en découlent (tableau 1). Les effets peuvent être complexes, car les bâtiments sont composés de nombreux systèmes différents, et les réponses aux changements climatiques d'un système peuvent avoir des effets imprévus sur d'autres systèmes. En

conséquence, les changements climatiques modifieront non seulement la conception des bâtiments, mais également la performance des bâtiments existants au Canada, ce qui réduira souvent leur durée de vie utile prévue. Un nombre croissant d'événements météorologiques extrêmes, conjugués à la vulnérabilité du parc de vieux bâtiments, pourrait également mener à des défaillances structurales de bâtiment avec les coûts économiques et sociaux qui s'ensuivent.

Le besoin de résilience climatique dans les bâtiments s'exprime dans un nombre relativement élevé d'outils, de pratiques et de guides pertinents pour accroître la résilience climatique des bâtiments nouveaux et modernisés. Voici quelques exemples notables : le protocole d'évaluation du Comité sur la vulnérabilité de l'ingénierie des infrastructures publiques (CVIIP) (Ingénieurs Canada, 2011), les guides pour des habitations plus sûres de l'Institut de prévention des sinistres catastrophiques (IPSC) (Institut de prévention des sinistres catastrophiques, 2010), le plan d'adaptation aux changements climatiques du Department of Housing and Urban Development des États-Unis (2014), le guide du constructeur de l'Insurance Institute for Business and Home Safety pour renforcer les habitations face aux aléas naturels (2008) et le rapport du Green Building Council des États-Unis, *Green Building and Climate Resilience* (Larsen, Rajkovich et coll., 2011). Il existe également plusieurs approches bien développées pour le milieu urbain-milieu périurbain en Amérique du Nord, y compris les normes sur les feux de végétation de la National Fire Protection Association (2017), l'*International Wildland-Urban Interface Code* de l'International Code Council (2011), les programmes *FireSmart* de FireSmart Canada (2017) et *Firewise* (2017), ainsi que des normes pour les bâtiments sur les plaines inondables de l'American Society of Civil Engineers (2014). Ces documents offrent des outils utiles pour intégrer les impacts des changements climatiques au CNB, mais il reste considérablement de travail à accomplir pour déterminer la méthode la plus efficace en vue d'intégrer l'information disponible au CNB.

Tableau 1 – Impact des changements climatiques sur les bâtiments

Danger climatique	Impact
Inondations	<ul style="list-style-type: none"> ● Incidents croissants de dommages et de défaillance des bâtiments ● Incidents croissants de perte de fonction
Changements dans les niveaux de précipitations et d'humidité relative	<ul style="list-style-type: none"> ● Vieillesse accélérée des bâtiments en raison de l'exposition à l'humidité ou de cycles rapides de mouillage-séchage ● Conception inadéquate d'écran pare-pluie
Changements dans les charges dues à la neige	<ul style="list-style-type: none"> ● Risque accru de dommages structuraux ou d'effondrement des toitures ou du bâtiment
Changement des températures maximales et minimales	<ul style="list-style-type: none"> ● Augmentation des charges de refroidissement ● Surchauffe des espaces occupés ● Augmentation des taux de détérioration et de vieillissement des matériaux et systèmes du bâtiment ● Changements dans les dommages d'origine biologique (insectes, rongeurs et moisissures) ● Changements des exigences du système énergétique
Chaleur extrême	<ul style="list-style-type: none"> ● Augmentation des taux de détérioration et de vieillissement du bâtiment ● Surchauffe des espaces occupés

Gel et dégel	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des taux de détérioration et de vieillissement des matériaux et systèmes du bâtiment
Vents extrêmes	<ul style="list-style-type: none"> • Probabilité accrue de dommages à l’enveloppe du bâtiment • Probabilité accrue de dommages structuraux et de défaillance
Incendies de forêt	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des taux de perte et de défaillance du bâtiment

4.3 Écarts de connaissances et besoins en recherche liés au CNB

Certains volets du CNB pourraient être abordés afin d’augmenter la résilience climatique des bâtiments. Un problème clé tient au fait que le CNB repose sur des charges climatiques historiques présumant un climat stationnaire. La nécessité de produire des données climatiques à jour est énoncée à la section 3 du présent rapport, mais une fois que des données à jour auront été produites, elles devront être converties en charges climatiques actualisées qui peuvent être intégrées à la conception des nouveaux bâtiments. Les effets des charges permanentes, des surcharges et des charges climatiques combinées sur les bâtiments doivent aussi être réexaminés en tenant compte des changements climatiques et des événements météorologiques extrêmes. Enfin, il faudra évaluer les exigences actuelles du CNB en matière de variation régionale des charges climatiques afin de s’assurer qu’elles correspondent aux futures variations et produisent des risques uniformes et cohérents de défaillance à l’échelle du pays.

Lorsque les charges climatiques attendues seront connues, il faudra évaluer les répercussions de ces charges sur les systèmes du bâtiment afin de cerner les cas pour lesquels les durées de vie utile prévues devraient diminuer et les risques pour la sécurité, augmenter. Certains cas devront être retenus pour évaluation en laboratoire afin de confirmer les impacts climatiques attendus, et les protocoles de mise à l’essai des matériaux de construction devront être mis à jour pour tenir compte des effets attendus des changements climatiques. Il faudra également modifier les normes pertinentes de la CSA sur la durabilité du bâtiment et les matériaux de construction.

4.3.1 Lacunes dans le contenu du Code du bâtiment

En plus de la nécessité de modifier les charges climatiques, un examen du CNB a révélé des lacunes particulières dans son contenu, qui deviendront plus marquées en raison des changements climatiques. Ces lacunes comprennent la conception en vue de la saison estivale de climatisation et l’adaptation de la conception des fondations aux changements climatiques. Bien que le climat canadien ait auparavant imposé de mettre l’accent sur la conception en vue de la saison de chauffage, les changements climatiques exigeront d’inclure la saison de climatisation, en particulier pour prévenir la surchauffe des espaces intérieurs. Il faudra donc élaborer des lignes directrices sur les pratiques exemplaires en matière de refroidissement.

Les fondations (figure 4) sont un autre domaine à approfondir, car la conception géotechnique actuelle présume un climat stationnaire et des propriétés des sols qui ne varient pas dans le temps. Les changements climatiques pourraient affecter le comportement mécanique des sols et la stabilité des systèmes de fondation, et aussi modifier la capacité portante du sol, entraînant un affaissement ou un soulèvement des fondations, et ensuite la défaillance des fondations. Il est donc nécessaire d’examiner la méthodologie utilisée dans la conception géotechnique pour tenir compte des changements potentiels dans les propriétés des sols et des roches ou le niveau des eaux souterraines, y compris les variations saisonnières et interannuelles. Ces changements pourraient toucher la plupart des secteurs de l’infrastructure et des bâtiments. Des études sur le terrain, en laboratoire et en modélisation s’imposent pour mieux comprendre les impacts climatiques sur les sols canadiens et mettre à jour convenablement les directives de conception.

4.3.2. Besoins des parties intéressées en toiture

Les parties intéressées du secteur de la toiture ont été mobilisées dans le cadre d'un atelier tenu le 15 décembre 2016 à Ottawa (Ontario), ainsi que dans le cadre de quatre consultations distinctes portant sur des sujets précis, notamment :

- l'adaptation aux changements climatiques de la toiture résidentielle;
- les répercussions thermiques des changements climatiques sur les matériaux de construction canadiens;
- les effets des conditions météorologiques extrêmes sur les toits canadiens, notamment les ponts thermiques; et
- les évaluations des ouragans.

Les discussions avec les parties intéressées, s'ajoutant à d'autres recherches, ont permis de cerner trois grands besoins qui devraient être comblés pour s'assurer que les toitures sont résilientes aux changements climatiques. Ces besoins comprennent :

1. l'élaboration de lignes directrices pour la mise en service et la certification de la résilience des toits soumis à des événements météorologiques extrêmes;
2. l'élaboration d'outils fondés sur la fiabilité pour la conception et l'analyse des toits afin de s'assurer qu'ils peuvent résister à des événements météorologiques extrêmes; et
3. la codification des propriétés des matériaux de construction sensibles au climat afin de mettre à jour les bases de données existantes, élaborées dans les années 1990 en postulant un climat stationnaire.



Figure 4 – Dommages aux fondations causés par des conditions de sol sec à Ottawa, 2016 (Photo de T. Manning)

4.3.3. Renforcement de la résilience aux conditions météorologiques extrêmes

Les bâtiments de protection civile, qui devraient demeurer fonctionnels pendant et après un événement météorologique extrême ou autre catastrophe, sont conçus pour des capacités de charge accrue en appliquant des facteurs d'importance. Toutefois, ces charges ne tiennent pas compte expressément de l'impact prévu des conditions météorologiques extrêmes dans un climat changeant. D'autres bâtiments ne sont pas conçus pour tenir compte du même niveau d'événements météorologiques extrêmes.

Les charges climatiques actuelles utilisées pour la conception de bâtiments de protection civile et de bâtiments importants doivent être réexaminées et mises à jour, compte tenu des augmentations prévues de l'intensité et de la fréquence des événements météorologiques extrêmes. De plus, les catégories de bâtiments considérés de protection civile doivent être réexaminées à la lumière des plans de gestion des urgences et de rétablissement actuels, ce qui pourrait ajouter de nouveaux types de bâtiments dans la catégorie de protection civile. Si des changements substantiels doivent être apportés aux procédures de construction de bâtiments de protection civile, des techniques d'évaluation et de renforcement possible de la résilience climatique des bâtiments de protection civile deviendront nécessaires.

Les causes les plus probables de catastrophes météorologiques comprennent les incendies de forêt, les inondations, les vents extrêmes, les charges dues à la neige excessives et les tempêtes de verglas. Dans le cas d'une tempête de verglas, le risque principal touche les lignes électriques, risque pouvant être traité par des modifications au Code canadien de l'électricité. Les incendies de forêt, les inondations et les vents extrêmes représentent cependant tous des enjeux qui peuvent être abordés dans les codes du bâtiment. De récents incendies de forêt ont entraîné la perte de plus de 2700 structures, la perte totale assurée étant estimée à plus de 5 milliards de dollars. L'incendie de forêt de 2016 à Fort McMurray (figure 5) était la catastrophe la plus coûteuse de l'histoire canadienne. Globalement, les inondations du sud de l'Alberta et de Toronto en 2013 ont entraîné des pertes d'assurance combinées s'approchant de la valeur de celles de Fort McMurray. Le Canada atlantique a récemment subi des ouragans et des tempêtes de vent non cycloniques avec des vents de force ouragan, tandis que les provinces des Prairies et l'Ontario ont connu un nombre croissant d'événements de tornades.

Chaque domaine météorologique extrême exigera un travail considérable afin de mieux comprendre les risques qui s'y rattachent et de produire des directives de conception appropriées. Dans le cas des incendies de forêt et des inondations, des travaux supplémentaires sont nécessaires pour produire une documentation et des lignes directrices connexes traitant d'enjeux qui ne sont pas spécifiquement liés à la conception du bâtiment. Un code ou un guide national de prévention des incendies pour le milieu urbain-milieu périurbain devrait être élaboré à partir des pratiques exemplaires existantes, de la recherche, de la modélisation et du travail sur le terrain. Les outils possibles pour améliorer la résilience des bâtiments aux inondations vont de la création de nouvelles normes à de nouvelles dispositions de conception pour les bâtiments sur des plaines inondables, en passant par de nouvelles technologies d'atténuation. Il faudrait également aligner les pratiques exemplaires sur les données climatiques révisées et les cartes de plaines inondables. D'autres questions relatives aux inondations sont abordées ailleurs dans le présent rapport.



Figure 5 – Incendie de forêt de Fort McMurray en Alberta, 2016 (Terry Reith, SRC)

Les mesures nécessaires pour faire face aux impacts des vents extrêmes sur les toits ont été cernées lors d'un atelier sur les systèmes de toiture résilients aux changements climatiques, tenu le 15 décembre 2016 au CNRC. Les trois lacunes suivantes ont été relevées dans le cadre de la consultation :

- l'absence de lignes directrices exhaustives pour évaluer la capacité des toits existants à la suite d'événements météorologiques importants ou pour valider la capacité des nouveaux toits exposés à des événements météorologiques extrêmes;
- la nécessité d'une base de données complète sur les propriétés des matériaux de construction soumis à des conditions climatiques extrêmes au Canada; et
- le besoin d'établir une cartographie de la résilience pour les toits au Canada.

Enfin, il serait important de réévaluer les dispositions relatives aux charges dues à la neige du CNB. L'une des causes tient à l'augmentation du niveau de neige que le Canada atlantique devrait recevoir en raison des changements climatiques (section 3). De plus, les charges dues à la neige sur les nouvelles constructions sont plus élevées que celles sur des bâtiments plus vieux, car les techniques d'isolation et de construction améliorées permettent d'accumuler plus de neige sur les toits au cours de l'hiver. Les charges dues à la neige actuelles du CNB supposent un certain degré de fonte, ce qui n'est peut-être plus vrai. Les charges dues à la neige excessives peuvent causer des dommages structuraux aux bâtiments, ce qui rend l'exactitude des dispositions du CNB essentielle pour assurer la sécurité des bâtiments.

4.4. Écarts de connaissances et besoins en recherche hors des exigences du CNB

Actuellement, le CNB s'applique à la construction de nouveaux bâtiments, mais des progrès sont en cours en vue d'inclure l'évaluation et la réhabilitation des bâtiments existants, changements qui seraient probablement apportés au CNB dans le cycle d'élaboration des codes de 2025. Ce changement intégrera progressivement une résilience climatique dans le parc actuel de bâtiments. Il manque toutefois d'orientations sur l'évaluation de la résilience climatique des bâtiments existants et sur les méthodes appropriées pour adapter les bâtiments existants afin d'en assurer la résilience climatique. Ce besoin est le plus criant pour les bâtiments de protection civile et de risque élevé, et les bâtiments dans les collectivités éloignées, tout en étant important pour tous les bâtiments.

Les petites collectivités éloignées présentent des besoins et des défis uniques face aux changements climatiques en raison de leur emplacement et des ressources techniques et financières limitées. C'est particulièrement le cas des collectivités autochtones où les bâtiments ne sont pas tenus de respecter le CNB, le CNPI ou le CNP. Une stratégie exhaustive de résilience climatique pour les bâtiments nouveaux et existants dans les collectivités éloignées devra être élaborée conjointement avec les parties intéressées autochtones et des Premières Nations. Une approche globale devrait être adoptée pour englober non seulement la résilience aux changements climatiques, mais aussi l'intégrité structurale, la sécurité incendie, les conditions de vie saines, les difficultés d'approvisionnement et de ressources, ainsi que le savoir traditionnel autochtone.

5. Ponts

5.1 Contexte

Les ponts sont des liens essentiels dans les réseaux de transport routier et ferroviaire, où ils permettent aux véhicules de franchir d'importants obstacles comme les rivières et d'autres réseaux de transport. Il est généralement possible de remédier à une fermeture d'autoroute ou une réduction des voies par des détours ou des aménagements temporaires pendant que l'on procède à des réparations, mais il n'y a pas de détour facilement disponible si un pont fait l'objet de restrictions supplémentaires pour la circulation intense ou s'il est complètement fermé. En outre, une défaillance potentielle d'un pont important a de graves conséquences en matière d'impact socioéconomique, de perte de vie, et de blessures.

Les ponts routiers et autoroutiers au Canada sont généralement conçus conformément au Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CCCPR), géré par le Groupe CSA dans la série de normes CSA S6 (Association canadienne de normalisation, 2014). Cette norme établit une durée de vie de 75 ans, avec une probabilité acceptable de défaillance d'environ 0,02 % et un indice de fiabilité de 3,5 sur la durée de vie théorique. L'objectif pour un pont important est d'assurer une durée de vie théorique encore plus longue, avec une durée attendue de 125 ans pour le nouveau pont sur le Saint-Laurent qui remplacera le pont Champlain vieillissant de Montréal. Traditionnellement, les ingénieurs de ponts se sont fondés sur les données climatiques historiques pour concevoir les systèmes de ponts. Les charges climatiques utilisées dans le CCCPR pour la conception structurale des ponts comprennent les températures minimales et maximales, l'accrétion de glace, les charges d'eau et de glace, et la pression du vent. En général, les conditions météorologiques extrêmes sont plus critiques que les tendances sous-jacentes, mais les postulats selon lesquels le climat est stationnaire dans les codes de conception actuels des ponts mènent probablement à des ponts exploités avec des risques plus élevés de défaillance à long terme que ce qui est généralement considéré comme acceptable. L'incertitude entourant l'impact des conditions météorologiques extrêmes et du climat en évolution sur les ponts existants, qui ont parfois plus de 100 ans, entraîne d'autres complications dans l'estimation des risques liés au climat pour les ponts du Canada.

La présente section du rapport décrit les effets du climat sur les ponts et répertorie les écarts de connaissances et les besoins en recherche qui doivent être comblés afin de maintenir les ponts du Canada dans un état sécuritaire et fonctionnel pour l'avenir. Cette information s'applique de manière générale aux ponts routiers et ferroviaires, bien que les enjeux liés à la couche supérieure du tablier des ponts (chaussée ou rail) soient évidemment différents. Ces derniers thèmes sont abordés dans les sections 6 (Routes) et 8 (Réseaux de transport en commun) du présent rapport. Les questions liées à la conception des ponts propres au réseau ferroviaire sont également abordées à la section 8.

5.2 Effets climatiques sur les ponts

Les aléas climatiques potentiels pour les ponts sont résumés au tableau 2. L'un des principaux impacts est l'affouillement, c'est-à-dire l'entraînement avec le courant du sol autour ou sous les piles de pont, ce qui entraîne l'effondrement de piles et parfois du pont au complet. L'effondrement du pont Bonnybrook à Calgary en 2013 (figure 6) est un exemple de défaillance de pont en raison de l'affouillement.

Tableau 2 – Impacts des changements climatiques sur les ponts

Aléas climatiques	Impact
Inondation riveraine	<ul style="list-style-type: none"> • Affouillement en raison de l'accroissement de la profondeur et de la vitesse du courant menant à la défaillance de la culée ou des piles • Structure délogée et déplacée • Dommages à la chaussée ou au remblai • Restriction de la capacité hydraulique en raison de l'accumulation de débris • Dommages à des ouvrages annexes comme une clôture et une glissière en métal, ou la signalisation
Changements dans les niveaux des précipitations	<ul style="list-style-type: none"> • Capacité hydraulique insuffisante pour les nouveaux débits d'eau
Inondations côtières	<ul style="list-style-type: none"> • Inondation ou destruction partielle ou complète du pont • Corrosion causée par une pénétration d'eau salée • Hauteurs libres de navigation restreintes • Perte d'accès à l'approche du pont • Séparation du tablier du pont et de la structure inférieure • Dommages au tablier et aux poutres principales causés par la flexion négative et des dommages aux piles • Affouillement • Dommages à la superstructure du pont
Changement des plages de températures maximales et minimales	<ul style="list-style-type: none"> • Détérioration et défaillance des joints de dilatation • Détérioration en raison des cycles de gel-dégel • Taux accru de corrosion de l'acier d'armature et de construction • Tassement en raison du dégel du pergélisol • Réduction de la corrosion grâce à une moindre utilisation des sels de déglçage dans certaines régions
Chaleur extrême	<ul style="list-style-type: none"> • Expansion thermique des composants du pont et détérioration ou défaillance des joints de dilatation • Augmentation des taux de corrosion et de dégradation chimique
Vents extrêmes	<ul style="list-style-type: none"> • Perte de stabilité du pont • Contraintes causées par la vibration des tabliers, des tours et des ancrages de câbles
Accumulation de glace	<ul style="list-style-type: none"> • Embâcles pouvant affecter l'état et la sécurité des composants du pont, particulièrement les piles • Changements dans la dynamique des ponts à haubans pouvant entraîner une augmentation des vibrations et une éventuelle défaillance • Accumulation de glace sur la surface fluviale entraînant des dommages au tablier et son effondrement • Risque pour la sécurité du public en raison de chutes de glace sur les véhicules passant sous la superstructure
Incendies de forêt	<ul style="list-style-type: none"> • Dommages directs causés par le feu aux structures du pont • Dommages par des débris sur le tablier • Affouillement accru en raison de la perte de végétation

Bien que le CCCPR intègre des charges climatiques extrêmes dans le processus de conception, aucune de ces charges ne tient compte de l'impact des changements climatiques. Toutes les provinces et tous les territoires canadiens ont adopté certaines mesures d'adaptation au climat pour leurs systèmes de ponts, mais le processus le plus élaboré est celui de la Colombie-Britannique, où la province a rendu obligatoire la conception intégrant des charges induites par les changements climatiques. Mais même en Colombie-Britannique, il n'y a pas de processus de conception, de scénarios ou de cas de charge due à un événement extrême ou aux changements climatiques prescrits spécifiquement. Aucune approche ou orientation unifiée de la détermination des charges climatiques futures pour la conception des ponts n'est actuellement acceptée dans les administrations canadiennes. De plus, le CCCPR actuel ne tient pas compte des effets d'événements météorologiques extrêmes simultanés sur la performance des ponts, car ils sont considérés comme trop rares pour être préoccupants.



Figure 6 – Effondrement du pont Bonnybrook à Calgary, en Alberta, 2013
(Bureau de la sécurité des transports du Canada)

5.3 Écarts de connaissances et besoins en recherche

Un certain nombre de mécanismes ou modes susceptibles de causer des dommages ou des défaillances dans les ponts sont encore mal compris. Deux d'entre eux particulièrement, les embâcles et l'accrétion de la glace, sont mal compris parce qu'ils sont plus susceptibles de survenir dans les conditions environnementales canadiennes qu'aux États-Unis ou en Europe. Un embâcle se produit lorsque la glace fluviale ou côtière s'accumule contre les ponts en raison de l'action du vent et du réchauffement (figure 7). Cette glace peut endommager la structure inférieure et la superstructure du pont, et causer de l'affouillement lorsqu'elle est soudainement libérée. Des études individuelles ont été réalisées dans ce domaine, mais on en sait peu sur la façon dont la glace et les ponts interagissent, sur la fréquence à venir de ces problèmes ou sur les meilleures façons de les atténuer.

L'accrétion de glace se produit sur un pont lorsqu'il y a accumulation de glace sur la surface exposée des structures du pont en raison de pluie verglaçante ou de givrage dans les nuages. Dans les ponts de petite portée, la glace agit principalement comme une charge supplémentaire, mais pour les ponts de longue portée, elle peut affecter le comportement dynamique du pont. C'est particulièrement le cas des ponts à haubans, où l'accumulation de glace sur les câbles changera grandement le comportement vibratoire. La chute de la glace des haubans sur les tabliers de ponts oblige également souvent la fermeture de liaisons de transport importantes pour des raisons de sécurité. L'évolution causée par les changements climatiques des scénarios de charge due au vent nécessite également un examen plus approfondi.



Figure 7 – Pont endommagé par un embâcle, Torch River au Manitoba, 2017
(Municipalité régionale de Torch River)

D'autres écarts de connaissances importants sont de nature plus universelle. Voici quelques mesures à prendre pour les combler :

- élaborer de nouvelles données climatiques pour la conception des ponts intégrant les changements climatiques;
- examiner et mettre à jour les données climatiques historiques pour le CCCPR;
- élaborer des facteurs de charge appropriés pour des données climatiques non stationnaires et des combinaisons de charges;
- examiner l'incidence des températures et des vents extrêmes sur la performance des ponts;
- étudier les répercussions des inondations sur l'affouillement et la performance des ponts;
- examiner l'impact des changements climatiques sur les mécanismes de détérioration qui agissent dans le temps et en tenir compte dans la conception des ponts et les systèmes de gestion des biens;
- examiner l'impact des changements climatiques et des conditions météorologiques extrêmes sur les procédures d'évaluation de l'état des ponts et la prévision de la performance sur le cycle de vie utile; et
- mieux comprendre les charges théoriques découlant d'ondes de tempête et de vagues puissantes.

Une fois ces lacunes comblées, les lignes directrices de gestion des biens pour les ponts existants peuvent être produites ou modifiées pour tenir compte des effets des changements climatiques. Des études de cas peuvent ensuite être menées auprès de propriétaires de ponts pour valider les lignes directrices.

6. Routes

6.1 Contexte

Le réseau routier public au Canada compte plus de 1,13 million de kilomètres équivalents de routes à deux voies (Transports Canada, 2015). De ce total, environ 40 % des routes sont « revêtues », c'est-à-dire recouvertes de matières bitumineuses ou à base de ciment Portland, la chaussée bitumineuse étant le système le plus utilisé. Les 60 % restants sont « non revêtus », bien qu'ils comportent habituellement une structure technique. Cette analyse exclut les stationnements et les autres surfaces revêtues, qui débordent de la portée de l'initiative actuelle. L'impact des crues soudaines sur les surfaces imperméables comme les stationnements relève toutefois de la portée de l'initiative.

Bien que le revêtement de la route soit la composante que connaissent la plupart des gens, elle n'est qu'un élément du système routier global. Les tracés routiers comprennent un certain nombre de structures techniques, y compris des déblais, des remblais et des endiguements. La route en soi se compose de plusieurs couches conçues pour répartir la charge des véhicules sur toute la route, prévenant ainsi des dommages à long terme. Elle comprend aussi des fossés et des pentes conçus pour évacuer l'eau depuis la surface de la chaussée et l'empêcher de pénétrer la structure sous la surface. La couche de base des routes non revêtues sert également de surface de circulation et doit être conçue pour cette fonction.

Les changements climatiques et l'occurrence d'événements météorologiques extrêmes peuvent affecter tous les ouvrages techniques d'une route. Les dommages causés au revêtement de la route peuvent survenir en raison de différentes causes, mais le reste de la structure routière est très vulnérable aux changements dans la teneur en eau du sol et, en particulier, aux inondations. Dans certains cas, les dommages visibles sur le revêtement de la route sont causés par des problèmes sous la surface, et les couches de surface ainsi que celles inférieures doivent toutes deux être réparées ou remplacées pour régler le problème.

Les changements climatiques devraient nuire à la capacité des systèmes routiers de remplir leurs fonctions, entraînant des dommages coûteux, directement à la structure routière et indirectement par la perte de productivité et de débouchés économiques (Kirshen, Ruth et coll., 2008; Jacob, Maxemchuck et coll., 2011; Major, Omojola et coll., 2011). De plus, certaines routes ont dépassé leur durée de vie utile et parfois, elles n'avaient pas été construites conformément aux spécifications et aux lignes directrices. Cette section du rapport décrit les enjeux climatiques qui touchent les routes ainsi que la recherche nécessaire pour élaborer des orientations sur la production d'un réseau routier résilient aux changements climatiques.

6.2 Effets climatiques sur les routes

Les routes sont renouvelées généralement selon un cycle de 20 à 40 ans, en fonction du niveau d'utilisation et des dommages mécaniques et environnementaux. Elles représentent généralement un cas où l'adaptation aux changements climatiques peut s'implanter à long terme, plutôt qu'un besoin immédiat. Des aléas climatiques tels que la température de l'air, les précipitations, les cycles de gel-dégel, la vitesse du vent, le pourcentage d'ensoleillement et l'humidité relative, qui ont une incidence sur l'aménagement de la chaussée, changeront au fil du temps, mais les changements importants surviendront probablement sur une période de même échelle suivant les cycles subséquents de remplacement des routes. Par contre, les conditions météorologiques extrêmes peuvent causer des problèmes pour les réseaux routiers à court terme (figure 8). Cette différence offre l'occasion de mettre l'accent sur les changements aux pratiques actuelles de construction et de gestion des routes afin de gérer les impacts météorologiques extrêmes tout en surveillant l'incidence des changements climatiques au fil du temps et en recueillant des données pour les futures modifications de la pratique.



Figure 8 – Route et voie ferrée emportées par les eaux,
Peace River Country en C.-B., 2016
(Ministère des Transports et de l'Infrastructure de la C.-B.)

Les principales répercussions des changements climatiques et des conditions météorologiques extrêmes sur les routes sont exposées dans Meyers et coll., 2014. Cette information, de concert avec d'autres répercussions tenant compte des aspects particuliers du climat canadien, est résumée au tableau 3. L'examen du tableau montre que les principales causes possibles de dommages aux routes sont les suivantes :

- vagues de chaleur;
- inondations et précipitations fortes; et
- gel et dégel.

Une enquête réalisée en 2010 auprès des organismes membres de l'Association des transports du Canada (ATC) a révélé que les effets des changements climatiques sur les chaussées avaient été évalués par quelques organismes (Association des transports du Canada, 2013). Au moment de l'enquête, 71 % des organismes fédéraux et provinciaux évaluaient les impacts potentiels des changements climatiques sur leurs chaussées, comparativement à seulement 21 % des municipalités. Les plus grandes villes possèdent probablement la capacité de réagir aux changements climatiques et aux conditions météorologiques extrêmes, tandis que les municipalités de moindre taille pourraient n'avoir aucune capacité de réagir aux changements climatiques.

Bien que l'adaptation aux effets des changements climatiques ne soit pas aussi urgente pour les routes que pour d'autres types d'infrastructures, ces effets ont néanmoins des répercussions, sur les coûts d'entretien en particulier. Les nids de poule et le soulèvement par le gel ne représentent généralement pas des risques structuraux pour les routes, mais ils causent des problèmes de circulation et peuvent imposer une réhabilitation prématurée des routes. Les décisions visant à améliorer la résilience à ce type d'effet climatique sont susceptibles d'être prises en fonction de facteurs économiques plutôt que de risques pour la sécurité, comme ce serait le cas pour certains types de dommages causés par les inondations.

Tableau 3 – Impacts des changements climatiques sur les routes (adapté de Meyer et coll., 2014)

Aléas climatiques	Impact
Inondations	<ul style="list-style-type: none"> • Emportement par les eaux et autres dommages
Changements dans les niveaux des précipitations	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des précipitations menant à des glissements de terrain et à des effondrements de talus • Humidité excessive du sol accélérant la détérioration de la route • Remblais routiers à risque de soulèvement ou d'affaissement • Retrait de séchage des sols sous la surface en raison de la sécheresse
Augmentation des précipitations intenses	<ul style="list-style-type: none"> • Fortes pluies avec des glissements de boue qui endommagent les routes (emportement par les eaux et sapement) et entraînent leur fermeture • Fortes précipitations et ruissellement accru causant des dommages aux tunnels, aux ponceaux et aux routes dans les zones inondables ou à proximité, ainsi qu'aux autoroutes côtières
Montée du niveau des océans et augmentation des ondes de tempête	<ul style="list-style-type: none"> • Érosion de la couche de base des routes côtières • Inondation temporaire et permanente de routes et tunnels • Empiètement de l'eau salée entraînant une dégradation accélérée des tunnels • Érosion côtière accrue en raison de la perte de milieux humides côtiers et d'îles barrières, faisant disparaître une protection naturelle contre les vagues • Inondations plus fréquentes et plus graves des tunnels souterrains et d'autres infrastructures de faible élévation
Changement des températures maximales extrêmes	<ul style="list-style-type: none"> • Détérioration prématurée des revêtements routiers • Dommages aux routes par flambage et formation d'ornières • Revêtement de béton exposé à des contraintes thermiques supplémentaires
Changement des plages de températures maximales et minimales	<ul style="list-style-type: none"> • Cycles de gel-dégel accrus à de nombreux endroits, créant des soulèvements par le gel et des nids de poule sur les surfaces des routes et des ponts • Augmentation de l'instabilité des pentes, des glissements de terrain et de l'érosion des berges par le dégel du pergélisol, entraînant des dommages à la route • Réduction du soulèvement par le gel et des dommages à la route dans certaines régions

6.3 Écarts de connaissances et besoins en recherche

Il existe des informations génériques à propos des effets des changements climatiques sur les routes, mais les recommandations et les connaissances détaillées sont rares (Federal Highway Administration, 2015). Ce manque de connaissances précises peut être attribuable aux cycles de renouvellement relativement courts des routes. Compte tenu des connaissances actuelles sur les changements climatiques et les impacts des conditions météorologiques extrêmes sur les routes, les besoins particuliers en recherche liés à l'infrastructure routière peuvent être classés dans trois domaines.

- **Meilleure compréhension des risques associés aux effets des changements climatiques et des conditions météorologiques extrêmes sur les routes :**
L'analyse documentaire laisse penser qu'il manque des données fiables relatives aux répercussions des changements climatiques et des conditions météorologiques extrêmes sur la performance du cycle de vie et les coûts de défaillance des routes. Certaines recherches expérimentales pourraient être nécessaires pour mieux comprendre les interactions de certaines charges climatiques avec des structures et des matériaux routiers. Des cartes d'aléas climatiques et des outils décisionnels sont nécessaires pour indiquer où les routes pourraient être vulnérables aux changements climatiques et aux conditions météorologiques extrêmes. Une attention particulière devrait être accordée aux routes et aux autoroutes essentielles, comme la Transcanadienne, la série des autoroutes 400 de l'Ontario et la route de Dempster.
- **Mesures d'adaptation des routes pour assurer une meilleure résilience climatique :**
Les méthodes de conception et de construction des routes sont relativement normalisées, mais pourraient devoir être améliorées dans un contexte de charges climatiques changeantes. Les domaines d'étude possibles comprennent l'amélioration des matériaux de la chaussée et de sa fondation, des changements dans la conception structurale, de meilleures techniques de modélisation pour la conception routière et la performance à long terme, ainsi que des méthodes améliorées de surveillance et de réparation.
- **Outils décisionnels pour l'évaluation du cycle de vie et l'analyse coûts-bénéfices du cycle de vie :**
Comme pour d'autres types d'infrastructures, il faut disposer de données pertinentes en appui de la mise en œuvre complète de ces méthodologies dans le cadre du processus décisionnel.

D'autres recherches hors de la portée de cette initiative sont nécessaires pour améliorer le fonctionnement des routes dans des conditions météorologiques extrêmes.

7. Réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées

7.1 Contexte

Les réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées sont des biens essentiels des collectivités canadiennes. Des défaillances localisées des réseaux de canalisations qui assurent l'acheminement et la collecte de l'eau constituent des désagréments, mais des défaillances du fonctionnement global de ces réseaux peuvent entraîner d'importants risques pour la santé et potentiellement des pertes de vie. Le bon fonctionnement de ces réseaux est donc une priorité majeure dans des conditions météorologiques extrêmes.

L'eau dans le sud du Canada provient de sources telles que des rivières, des lacs et des réservoirs, et est purifiée dans les usines de traitement, puis acheminée aux utilisateurs par l'entremise de réseaux de transport et de distribution. Une fois cette eau utilisée, elle entre dans le réseau d'égout sanitaire et est en principe traitée avant d'être retournée dans les eaux réceptrices. Les eaux pluviales sont recueillies par les égouts pluviaux, mais une infrastructure supplémentaire, comme des bassins de rétention et des tunnels intercepteurs, est généralement requise pour contrôler les débits de pointe et empêcher l'eau pluviale de dépasser la capacité des usines de traitement des eaux usées et d'être évacuée sans traitement.

Des réseaux d'égouts modernes séparent habituellement les égouts pluviaux et sanitaires. Les eaux pluviales nécessitent généralement moins de traitement que les eaux sanitaires. Elles présentent également de grandes différences entre les débits de pointe et les débits minimaux, alors que le niveau de débit dans les égouts sanitaires est plus constant. Les réseaux d'égouts plus anciens, qui existent toujours au Canada dans les centres urbains aménagés avant les années 1940, combinent souvent les égouts sanitaires et pluviaux. Lors d'orages intenses, quand les débits élevés surpassent la capacité du réseau d'égouts ou de l'usine de traitement des eaux usées, une partie des débits est détournée du réseau vers des eaux réceptrices au niveau d'un barrage-déversoir. Ces débordements vont à des structures appelées déversoirs d'orage, qui contiennent à la fois des eaux de ruissellement et des eaux usées municipales.

La plupart des réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées dans l'Arctique fonctionnent de façon très différente de ceux du sud du Canada. Des facteurs tels que les froids extrêmes auxquels doivent résister les infrastructures, les faibles précipitations (surtout dans l'est), les conditions liées au sol (pergélisol), la saison de construction extrêmement courte, les difficultés liées au transport des matériaux de construction, les retards dans l'approvisionnement en matériel spécialisé et une main-d'œuvre insuffisante présentent des défis importants qui nécessitent des solutions uniques et souvent adaptées au site. L'impact élevé des changements climatiques dans l'Arctique signifie également qu'il faudra déployer des efforts supplémentaires pour aménager des réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées résilients aux changements climatiques dans cette région. Ces défis ne font pas partie de l'initiative BIPBRCC, mais ils sont inclus ici par souci d'exhaustivité.

7.2 Effets climatiques sur les réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées

Les impacts des changements climatiques et des conditions météorologiques extrêmes sur les réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées sont résumés au tableau 4. Les égouts pluviaux et les égouts unitaires, avec leurs réseaux d'évacuation connexes, sont les types de réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées les plus vulnérables dans le sud du Canada. On observe généralement deux types de défaillances opérationnelles dans un réseau urbain d'égouts pluviaux, tous deux liés à un dépassement de capacité de l'égout, mais avec des conséquences différentes. Dans le premier type, la quantité d'eaux pluviales acheminées au réseau d'égouts est si grande que les bassins de rétention, les canalisations d'égout et d'autres parties du réseau ne sont pas en mesure d'évacuer en temps opportun l'eau de l'endroit où elle s'accumule (Olsson et coll., 2013). La conséquence est une inondation localisée ou généralisée, comme c'était le cas lors de l'inondation de Toronto en 2013 (figure 9). Dans le second type de défaillance opérationnelle, l'inondation est évitée en détournant certaines des eaux d'inondation directement vers les eaux réceptrices, soit localement ou à partir des usines de traitement de l'eau. Dans ce cas, la conséquence est la pollution des eaux réceptrices. Les inondations peuvent causer des dommages considérables, des blessures, des maladies et des pertes de vie, mais le déversement d'eaux usées non traitées vers des eaux réceptrices peut également présenter des risques notables pour la santé humaine et des impacts environnementaux importants.

Tableau 4 – Impacts des changements climatiques sur les réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées

Aléas climatiques	Impact
Augmentation des précipitations	<ul style="list-style-type: none"> • Occurrence plus fréquente et intense d'inondations causées par le manque de capacité des égouts pluviaux • Incapacité d'accéder aux composants du réseau • Dommages aux composants du réseau par les inondations ou la surcharge • Nécessité d'accroître la capacité du réseau • Augmentation du captage et des infiltrations dans les égouts sanitaires, augmentant la charge dans les usines de traitement des eaux usées • Changements dans les interactions canalisation-sol qui pourraient causer des défaillances des canalisations • Changement dans la qualité et la quantité de l'eau dans l'Arctique
Intervalles raccourcis entre les précipitations	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction de la capacité d'absorption de l'eau des surfaces de drainage
Sécheresse	<ul style="list-style-type: none"> • Dommages aux étangs de rétention et aux milieux humides utilisés pour la gestion des eaux pluviales • Changements dans les interactions canalisation-sol qui pourraient causer des défaillances des canalisations • Changements dans la demande d'eau, pouvant affecter la capacité du réseau d'eau • Changement dans la qualité et la quantité de l'eau dans l'Arctique
Inondations côtières	<ul style="list-style-type: none"> • Intrusion saline dans les réseaux d'égouts et aquifères côtiers • Détérioration accrue de l'infrastructure souterraine

	<ul style="list-style-type: none"> • Inondation d'installations de faible élévation comme des usines de traitement de l'eau et des eaux usées
<p>Changement des plages de températures maximales et minimales</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Changement des schémas de ruissellement en hiver et au printemps en raison des variations des cycles de gel-dégel et du taux de fonte des neiges • Changements dans les propriétés biochimiques des sources d'eau, des eaux de ruissellement et des eaux usées, ce qui pourrait avoir une incidence sur l'efficacité des usines de traitement • Changements dans la demande d'eau, pouvant affecter la capacité du réseau d'eau • Changement dans la qualité et la quantité de l'eau dans l'Arctique • Dommages aux installations de traitement de l'eau et des eaux usées dans l'Arctique

Les réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées sont moins menacés par les changements climatiques, bien qu'il y ait encore des impacts potentiellement importants susceptibles d'affecter leur fonctionnement. En revanche, les infrastructures de l'Arctique comptent largement sur l'état du pergélisol, de la neige et de la glace pour assurer leur stabilité et leur fonction. Les températures plus élevées attribuables aux changements climatiques pourraient compromettre la stabilité, la fonctionnalité et l'accessibilité des réseaux. Par conséquent, les réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées dans l'Arctique pourraient exiger d'importants changements ou un remplacement complet pour demeurer fonctionnels au fil de l'évolution des changements climatiques (Johnson, 2017).



Figure 9 – Effets d'un drainage inadéquat des eaux pluviales à Toronto, 2013 (Frank Gunn, Presse canadienne)

Les réseaux d'évacuation des eaux pluviales sont généralement conçus à partir de courbes IDF (section 3.4) ou d'orages théoriques, deux références qui devraient être affectées par les changements climatiques (Peck et coll., 2012). Plusieurs municipalités (Moncton, Ottawa et Markham, entre autres) ont pris en considération l'adaptation aux changements climatiques en appliquant un facteur de sécurité à la conception de nouveaux réseaux d'égouts pluviaux. L'approche type a consisté à augmenter les intensités de précipitations à partir des courbes IDF disponibles de 20 % à 25 % afin d'accroître les capacités du réseau. Il semble qu'il ne soit pas pratique courante de produire des analyses économiques détaillées pour justifier les niveaux d'investissement requis afin de satisfaire l'aversion pour le risque.

Des efforts limités sont déployés pour tenir compte des effets des changements climatiques dans les réseaux d'égouts sanitaires. La situation est semblable pour les réseaux d'alimentation en eau potable, mais de nombreuses municipalités ont mis en œuvre des mesures de gestion de la demande en eau pour réduire la quantité d'eau qu'elles fournissent chaque année. Bien qu'elles ne soient pas conçues expressément pour traiter des enjeux liés aux changements climatiques, ces mesures contribuent à accroître la résilience du réseau d'alimentation en eau potable en réduisant la demande globale. De plus, les petites conduites de distribution d'eau sont généralement surdimensionnées pour accommoder des débits nécessaires à la lutte contre l'incendie, ce qui réduit la probabilité qu'il devienne nécessaire d'accroître leur capacité pour répondre à une demande croissante. Il faudra peut-être renforcer la capacité hydraulique des conduites principales si la demande augmente. En pratique toutefois, jusqu'à maintenant, un certain degré de résilience de l'infrastructure est obtenu par la redondance, ce qui signifie invariablement le retour à des méthodes éprouvées, plutôt que des mesures propres aux changements climatiques.

7.3 Écarts de connaissance et besoins en recherche

Bon nombre des lacunes les plus importantes au chapitre des connaissances liées aux réseaux d'égouts pluviaux sont en fait des lacunes liées aux pluies extrêmes et aux inondations. Il y a toutefois des enjeux précis liés à la prévention ou à l'atténuation des inondations urbaines qui devraient être abordés, notamment :

- examiner l'incidence de l'augmentation, au fil du temps, des superficies imperméables en milieu urbain, qui accroissent la vulnérabilité aux tempêtes;
- étudier l'efficacité de mesures locales comme le débranchement de descentes d'eau pluviale et l'amélioration de l'entretien des égouts pour réduire les inondations;
- étudier l'efficacité de l'infrastructure verte, comme les revêtements routiers perméables et les toits verts, et de l'augmentation des superficies de parcs et de boisés comme mécanismes d'atténuation; et
- mieux comprendre l'incidence de l'évolution des cycles de gel-dégel sur les systèmes de drainage.

Dans le cas des réseaux d'égouts sanitaires, il faut mieux comprendre les effets des changements climatiques sur l'entrée et l'infiltration de l'eau du sol environnant dans le réseau d'égouts sanitaires. Ces effets sont généralement considérés comme constants au fil du temps, mais ils peuvent changer tout au long de l'année et en raison de l'incertitude et de la non-stationnarité des charges climatiques. Les exploitants de réseaux d'alimentation en eau potable doivent mieux comprendre l'impact des changements climatiques et des conditions météorologiques extrêmes sur les propriétés biochimiques des sources d'eau, la demande d'eau et le traitement de l'eau.

Les enjeux généraux liés aux réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées dans le sud du Canada comprennent les besoins suivants :

- meilleure connaissance de l'impact des changements climatiques sur l'efficacité des technologies de traitement des eaux d'entrée et des eaux usées;
- compréhension des effets probables des changements climatiques sur l'infiltration et l'exfiltration d'eau des canalisations d'égout; et
- meilleure compréhension de l'incidence des changements de température et des tendances de précipitations sur l'intégrité structurale des canalisations souterraines d'eau et d'eaux usées.

La situation des réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées dans l'Arctique est plus problématique. Non seulement les changements climatiques auront-ils un impact grave sur l'environnement arctique, mais il y a peu de recherches et de connaissances disponibles pour appuyer des changements aux pratiques actuelles. Parmi les principaux besoins de l'infrastructure de l'eau dans l'Arctique, on retrouve :

- l'étude de l'impact ultime des changements climatiques sur les sources d'eau et la mise en valeur d'autres sources d'approvisionnement en eau (souterraine et de surface) dans les environnements de pergélisol;
- les conceptions, normes et bonnes pratiques d'ingénierie de remplacement pour l'admission, le stockage et le traitement de l'eau brute;
- les conceptions, normes et bonnes pratiques d'ingénierie de remplacement pour les réseaux de distribution d'eau et de collecte des eaux usées (réseau de distribution aérien sous coffre);
- les conceptions, normes et bonnes pratiques d'ingénierie de remplacement en matière de traitement des eaux usées;
- l'évaluation de l'incidence de la qualité des effluents sur les eaux réceptrices, la santé communautaire et l'environnement arctique;
- les études locales sur des sources d'eau de remplacement dans les collectivités de l'Arctique; et
- les conceptions et technologies novatrices et robustes, ainsi que de nouveaux matériaux pour divers composants des réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées.

Enfin, il n'y a actuellement aucune installation disponible pour mettre à l'épreuve et valider de nouvelles technologies dans les conditions réelles de l'Arctique. De telles installations doivent être aménagées pour fournir des solutions résilientes au climat dans l'Arctique. Comme nous l'avons mentionné précédemment, la recherche sur ces besoins ne relève pas de la portée de l'initiative BIPBRCC.

8. Réseaux de transport en commun

8.1 Contexte

Les réseaux de transport en commun constituent un élément clé des réseaux de transport urbain et suburbain au Canada. La plupart des villes du Canada, sinon toutes, ont des réseaux de transport en commun. Certaines grandes villes disposent également de réseaux de transport en commun sur rail, allant du tramway au réseau de train léger, en passant par le métro souterrain et le métro aérien.

Les réseaux de transport en commun par autobus et sur rail représentent des utilisations différentes, avec des avantages différents. Les réseaux de transport en commun par autobus utilisent habituellement les routes et les ponts existants pour offrir leurs services. Les circuits sont souples et nécessitent peu d'infrastructures spécialisées, bien que certaines villes aient des réseaux routiers réservés exclusivement au transport rapide par autobus. Par contre, les réseaux de transport en commun sur rail sont conçus pour des charges de circulation plus lourdes que les autobus, fonctionnent sur des voies permanentes et ont des infrastructures spécialisées comparativement à d'autres modes de transport. Les circuits de tramway peuvent transporter 50 000 passagers ou plus par jour (Toronto Transit Commission, 2016), alors que les réseaux de métro de Toronto et de Montréal transportent habituellement près d'un million de passagers par jour (Dickens, 2016).

La présente section du rapport traite principalement de l'infrastructure de transport en commun sur rail. L'infrastructure de transport en commun par autobus est censée faire généralement partie des volets bâtiments, routes et ponts de l'initiative BIPBRCC. Les enjeux d'infrastructure de transport en commun qui ne sont pas abordés ailleurs dans le présent rapport sont explicitement mentionnés dans cette section. Bien que les trains de banlieue et les trains de passagers échappent à la portée de l'initiative BIPBRCC, ces systèmes subiront néanmoins des impacts similaires des changements climatiques, avec d'importants chevauchements en matière d'exploitants et d'installations. Les exploitants de trains de banlieue et de VIA Rail font donc partie du groupe de parties intéressées dont les besoins devraient être abordés par les activités de transport en commun sur rail de l'initiative BIPBRCC.

Les réseaux canadiens de train léger et de métro sont conçus selon une gamme variée de normes propres à chacun, qui peuvent toujours mettre en œuvre des pratiques historiques remontant à leur construction. Les trains de banlieue et les trains de passagers respectent les normes de l'American Railway Engineering and Maintenance-of-Way (AREMA). Les enjeux climatiques et les phénomènes météorologiques, comme les inondations, sont abordés dans certains aspects des normes, mais ne le sont pas ailleurs. Lorsque le climat est abordé dans les normes, il est présumé stationnaire. Les ponts ferroviaires de tous les types de réseaux sont également généralement conçus selon les normes de l'AREMA, des charges différentes étant utilisées dans le processus de conception selon que le pont est destiné au transport en commun par train léger, au métro ou aux trains de banlieue/de passagers. Dans l'un ou l'autre cas, la pratique standard consiste à inclure différentes charges climatiques et les périodicités connexes dans la conception pour tenir compte de l'impact probable de conditions météorologiques extrêmes sur le pont.

En plus des publications, l'une des principales sources d'information dans l'analyse des lacunes pour les réseaux de transport en commun était l'atelier sur la résilience climatique du transport en commun du CNRC/ACTU (Association canadienne du transport urbain), qui s'est tenu le 3 mars 2017 au CNRC. Parrainé conjointement par l'ACTU, l'atelier offrait aux propriétaires et aux exploitants de réseaux canadiens de transport en commun l'occasion d'exprimer directement leurs capacités et leurs besoins en matière d'adaptation aux changements climatiques. Certaines recommandations de la présente section du rapport sont fondées sur les résultats de l'atelier.

8.2 État de la pratique en matière de résilience climatique du transport en commun

Les participants à l'atelier du CNRC/ACTU étaient tous bien conscients des impacts possibles des changements climatiques sur leurs réseaux et s'en préoccupaient, mais seulement quelques-uns d'entre eux avaient pris des mesures pour évaluer et analyser les risques connexes et les atténuer. Les réseaux les plus avancés en ce qui concerne la résilience climatique sont Metrolinx dans la région du Grand Toronto et de Hamilton, TTC à Toronto et TransLink à Metro Vancouver. D'autres ne font que commencer à examiner la résilience climatique ou ne l'ont pas du tout considérée.

À l'échelle internationale, des études bien développées semblent avoir été réalisées au Royaume-Uni. Le Rail Safety and Standards Board (Arup T1009 Phase 2 Consortium, 2016; Marteaux, 2016) et le London Underground (Transport for London, 2015) ont étudié les besoins en résilience climatique du réseau ferroviaire britannique et ils élaborent des plans d'atténuation. D'autres pays européens ont examiné des problèmes particuliers, mais ils ne semblent pas disposer de plans d'ensemble de résilience climatique et d'atténuation (Marteaux, 2016).

Un facteur qui complique la définition d'orientations sur l'adaptation aux changements climatiques est qu'il n'existe pas de norme unique pour l'infrastructure de transport en commun sur rail dans l'ensemble du Canada. Les différents réseaux ont été installés à des époques très différentes et ont des équipements et des normes d'origine qui diffèrent également. Les orientations sur la résilience aux changements climatiques devront donc prendre la forme de pratiques exemplaires, plutôt que de codes ou de normes.

8.3 Aléas climatiques préoccupants

Les aléas suivants comptent parmi les principaux aléas climatiques jugés préoccupants par les exploitants et propriétaires de réseaux de transport en commun canadiens lors de l'atelier du CNRC/ACTU :

- les inondations (figure 10);
- le verglas et l'accumulation de glace;
- les cycles de gel-dégel; et
- les vagues de chaleur (figure 11).

Les opinions divergeaient sur l'importance de la foudre comme risque pour les réseaux. La neige et le vent ont été mentionnés dans le contexte de dommages causés aux gares et d'entraves aux opérations de transport en commun. Les principaux aléas climatiques recensés par les parties intéressées correspondent bien à ceux d'autres sources (tableau 5).



Figure 10 – Train de Metrolinx immobilisé lors des inondations de Toronto en 2013
(Winston Neutel, Presse canadienne)



Figure 11 – Rails déformés par une vague de chaleur en Australie, 2013
(Australian Transportation Safety Board)

Tableau 5 – Impacts des changements climatiques sur le transport en commun sur rail

Aléas climatiques	Impact
Inondations	<ul style="list-style-type: none"> • Accumulation d'eau dans les tunnels de métro • Ouvrages emportés par les eaux et autres dommages au terrassement • Dommages aux signaux de contrôle et autres systèmes électriques ferroviaires • Dommages structuraux aux voies • Dommages aux gares et autres bâtiments
Changements dans les niveaux des précipitations	<ul style="list-style-type: none"> • Glissements de terrain et ruptures de talus attribuables aux précipitations accrues
Verglas	<ul style="list-style-type: none"> • Aiguillages bloqués • Accumulations de glace sur les ponts, les câbles d'alimentation électrique et les tours d'alimentation électrique, pouvant causer des défaillances structurales • Glace empêchant l'alimentation des véhicules ou le fonctionnement sécuritaire de la voie
Changement des températures maximales extrêmes	<ul style="list-style-type: none"> • Déformation des rails • Dommages aux signaux et autres équipements électriques • Problèmes de ventilation dans les réseaux souterrains
Changement des plages de températures maximales et minimales	<ul style="list-style-type: none"> • Cycles de gel-dégel accrus à de nombreux endroits, créant un soulèvement des rails par le gel

En outre, les bâtiments de transport en commun comme les stations et les gares peuvent présenter des besoins uniques en matière de résilience climatique en raison de leur occupation. Les exigences de base pour les bâtiments seront couvertes par les changements au CNB décrits à la section 4 du présent rapport. Le grand nombre de personnes passant par les plateformes de transport en commun et la nécessité de maintenir les opérations de transport en commun après des événements météorologiques extrêmes créent des exigences pour régler des problèmes uniques, comme la ventilation dans les stations souterraines, la capacité d'évacuer les stations dans des conditions météorologiques extrêmes, le chauffage excessif des aires d'attente et des corridors sous verre, et la capacité de protéger les bâtiments contre les inondations.

8.4 Besoins des parties intéressées du transport en commun

En plus des aléas climatiques mentionnés ci-dessus, les parties intéressées du transport en commun ont priorisé les enjeux suivants :

1. Soutien à la résilience climatique à l'échelle du réseau
L'ACTU et les exploitants de transport en commun ont insisté à maintes reprises sur la nécessité de fournir des outils de résilience climatique pour l'ensemble de leurs réseaux de transport en commun, y compris les passagers et le personnel, les opérations, les véhicules et l'infrastructure.
2. Aide à l'analyse de rentabilisation pour le travail de résilience climatique
Les participants à l'atelier ont indiqué que la résilience climatique n'était pas considérée comme importante par l'ensemble des propriétaires/exploitants du transport en commun. Il faut mieux connaître les conséquences des changements climatiques et des conditions météorologiques extrêmes pour s'assurer que la résilience climatique est intégrée à la planification stratégique dans toute l'entreprise.
3. Base de données sur les aléas climatiques
Plusieurs participants à l'atelier ont proposé une base de données nationale sur les aléas climatiques.
4. Possibilités d'échange d'information et amélioration de la collaboration entre les réseaux de transport en commun
Les participants à l'atelier étaient désireux de continuer à se rencontrer et à échanger d'autres façons. Plusieurs participants ont également fait état de la nécessité d'une meilleure collaboration entre les réseaux de transport en commun qui partagent des installations.
5. Protection contre les inondations et atténuation
En plus des inondations mentionnées le plus souvent comme danger climatique potentiel, la prévention des inondations et l'atténuation de leurs effets ont été mentionnées expressément comme un besoin systémique.
6. Financement supplémentaire pour soutenir la résilience climatique
La nécessité d'un financement supplémentaire pour s'attaquer aux enjeux de résilience climatique a été mentionnée à l'atelier. Les participants ont soulevé des préoccupations au sujet de ressources limitées qui sont détournées des autres besoins opérationnels et d'infrastructure.

8.5 Écarts de connaissances et besoins en recherche

Plusieurs lacunes importantes en matière de connaissances liées à la résilience climatique des réseaux de transport en commun ont été relevées, notamment :

1. Manque d'information sur les réseaux de transport en commun canadiens
Une base de données unifiée est nécessaire pour indiquer la capacité des réseaux de transport en commun canadiens de gérer les risques, de faire le suivi des aléas climatiques affectant les réseaux de transport en commun et de recueillir des données d'inventaire d'infrastructure, ainsi que d'autres renseignements. Ces renseignements manquants sont importants pour formuler des lignes directrices techniques, évaluer les besoins et élaborer des protocoles de gestion des risques.
2. Renseignements manquants sur l'incidence du climat sur l'infrastructure du transport en commun sur rail
Les effets de chacun des principaux aléas climatiques recensés dans l'atelier du CNRC/ACTU sur l'infrastructure du transport en commun ne sont pas entièrement compris, tandis que les effets combinés ne semblent pas avoir fait l'objet d'une quelconque étude. Des recherches expérimentales et sur le terrain sont nécessaires pour évaluer adéquatement les risques liés aux changements climatiques dans l'infrastructure de transport en commun sur rail.

3. Absence de mesures d'adaptation aux changements climatiques
Même lorsque les effets climatiques sur l'infrastructure du transport en commun sont connus, il est parfois difficile de cerner des mesures d'atténuation appropriées. Des recherches sont nécessaires pour élaborer de meilleures solutions et résoudre d'autres problèmes liés aux impacts climatiques sur l'infrastructure.
4. Manque de compréhension des impacts indirects d'une défaillance de l'infrastructure du transport en commun
Les coûts indirects d'une défaillance d'infrastructure qui interrompt le fonctionnement d'un réseau de transport en commun sont probablement beaucoup plus élevés que les coûts directs de la défaillance, en raison de la perte de productivité et d'activité économique, et du potentiel de maladie, de blessure ou de décès. Les grandes villes sont plus susceptibles d'être vulnérables à ces coûts que les petites. Les coûts indirects ne sont toutefois pas bien compris ni bien quantifiés, ce qui empêche l'exécution de l'analyse coûts-bénéfices du cycle de vie de différentes stratégies d'adaptation aux changements climatiques.

L'un des enjeux clés concernant les changements climatiques et le transport en commun est l'exigence de la part des parties intéressées que l'on aborde la résilience climatique à l'échelle du réseau plutôt que seulement dans une perspective d'infrastructure. Il serait préférable de combler certaines des lacunes de connaissances susmentionnées dans ce contexte. Bien qu'une approche à l'échelle du réseau soit actuellement hors de la portée de l'initiative BIPBRCC, les domaines de recherche potentiels qui pourraient être abordés dans la portée de cette initiative comprennent ce qui suit :

1. Recherches sur l'incidence et la gestion de l'accumulation de glace sur les ponts, les voies et les systèmes de transmission d'électricité du transport en commun;
2. Recherches sur le terrain relatives à des enjeux particuliers d'impacts climatiques sur la géométrie des voies;
3. Collecte de renseignements sur les réseaux de transport en commun du Canada et la mise en œuvre d'une base de données nationale sur les aléas climatiques pour le transport en commun;
4. Élaboration de méthodes améliorées de contrôle sans contact des contraintes s'exerçant sur les voies;
5. Analyse des répercussions probables de l'augmentation des températures sur les défaillances d'équipement; et
6. Élaboration de lignes directrices pour identifier et atténuer les risques d'inondation, dans les tunnels et ailleurs.

Bon nombre de ces sujets exigeront des données et du soutien de la part des propriétaires/exploitants de réseaux de transport en commun. Dans le cas des recherches sur le terrain en particulier, le travail pourrait devoir être effectué en collaboration avec les réseaux de trains de banlieue ou VIA Rail afin de permettre l'analyse des secteurs problématiques connus.

9. Élaboration de codes, de normes et de guides

9.1 Introduction

Les codes, les normes et les guides sont les instruments par lesquels les gouvernements et les organismes de l'industrie gèrent le rendement et les risques associés aux BIPB. Les codes sont habituellement des règlements obligatoires qui peuvent être appliqués par des responsables gouvernementaux. Les normes sont habituellement des exigences obligatoires issues de l'industrie pour la performance ou la mise à l'essai des composants des BIPB; elles peuvent être intégrées par renvoi dans les codes et documents connexes ou d'autres normes. Les guides sont souvent des lignes directrices sur les pratiques exemplaires et ne sont pas d'application obligatoire. Les codes et les normes énoncent les performances minimales requises, tandis que les lignes directrices sur les pratiques exemplaires décrivent comment obtenir une performance optimale, ce qui exige habituellement un coût initial plus élevé, et entraîne un coût de cycle de vie moindre.

Les bâtiments au Canada sont réglementés par les codes du bâtiment provinciaux et territoriaux, qui sont fondés sur les codes modèles nationaux élaborés par la Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies (CCCBPI) et publiés par le CNRC. Il s'agit notamment du Code national du bâtiment (CNB), du Code national de prévention des incendies (CNPI), du Code de la plomberie (CNP) et du Code national de l'énergie pour les bâtiments (CNÉB). Chaque code modèle est mis à jour selon un cycle de cinq ans par des experts de partout au pays. Une fois approuvés par la CCCBPI, les codes mis à jour sont ensuite publiés par le CNRC.

Le Code canadien sur le calcul des ponts routiers (CCCPR) est élaboré et tenu à jour par l'Association canadienne de normalisation (CSA) au nom des gouvernements provinciaux, territoriaux et fédéral. Il est d'application obligatoire dans toutes les provinces, à l'exception du Manitoba, qui fait également appel aux spécifications de calcul des ponts de l'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) selon la méthode de calcul des facteurs de charge et de résistance (LRFD).

Les infrastructures en réseaux ne sont pas construites selon des codes nationaux spécifiques de la même façon que les ponts et les bâtiments. Les routes canadiennes sont généralement conçues selon les guides de l'Association des transports du Canada (*Guide canadien de conception géométrique des routes* (ATC, 2017) et *Guide de conception et de gestion des actifs des chaussées* (ATC, 2013)), et des normes ou spécifications établies par des propriétaires d'infrastructure, comme le *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* de l'AASHTO (AASHTO, 2015). La réglementation des réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées est régie par un chevauchement de compétences provinciales et fédérales, à des degrés plus ou moins complets selon la province. Dans de nombreux cas, les sources d'eau et les eaux réceptrices sont partagées entre des provinces, ce qui crée des conflits potentiels qui doivent être réglés à l'échelle interprovinciale ou intergouvernementale. L'autorisation de fournir des services d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées est habituellement déléguée par les provinces aux municipalités, qui peuvent décider de suivre les exigences réglementaires provinciales et fédérales minimales (lorsqu'elles existent) pour différents aspects de ces services, ou suivre d'autres lignes directrices plus strictes.

La situation relative aux normes des réseaux de transport en commun sur rail est également complexe. La réglementation est d'ordre provincial, mais elle peut être déléguée à l'exploitant du réseau. Chaque réseau est également visé par ses propres normes, mais on s'attend à ce que les nouveaux réseaux de train léger sur rail (TLR) qu'aménage Metrolinx soient conformes à des normes courantes. Facteur peut-être encore plus déterminant, les normes reposent sur des principes très différents, selon l'époque à laquelle le réseau a été construit et l'endroit où la technologie originale a été mise au point. Les normes AREMA sont très utiles pour comprendre les enjeux ferroviaires à régler, mais elles ne correspondent pas nécessairement à la pratique concrète, à l'exception des dispositions sur les trains de banlieue et les trains de passagers.

9.2 Codes, normes et guides existants intégrant des dispositions relatives aux changements climatiques

Il y a relativement peu d'instruments réglementaires qui traitent actuellement des impacts des changements climatiques. Au Canada, ces références comprennent le guide de pratique professionnelle de l'Association of Professional Engineers and Geoscientists of British Columbia pour l'élaboration de conceptions d'infrastructures routières résilientes aux changements climatiques en Colombie-Britannique (*Guidelines for Developing Climate Change-Resilient Designs for Highway Infrastructure in British Columbia – APEGBC Professional Practice*, APEGBC, 2016), le guide de l'Ontario pour les municipalités ontariennes, le manuel du cadre pour l'adaptation aux changements climatiques de l'Alberta (*Climate Change Adaptation Framework – Manual*), ainsi que des documents semblables élaborés par d'autres provinces. À l'échelle internationale, il existe certaines normes et stratégies, comme la norme australienne AS 5334 sur l'adaptation aux changements climatiques pour les communautés et l'infrastructure par une approche axée sur les risques (*Climate change adaptation for settlements and infrastructure – A risk based approach*, Standards Australia, 2013), la stratégie et le cadre d'adaptation aux changements climatiques du Royaume-Uni (*Climate Change Adaptation Strategy and Framework*, United Kingdom Roads Agency, 2009) et le guide d'adaptation aux changements climatiques pour la gestion, les opérations et l'entretien des systèmes de transport des États-Unis (*Climate Change Adaptation Guide for Transportation Systems Management, Operations, and Maintenance*, US Federal Highway Administration, 2015).

9.3 Codes, normes et guides canadiens servant d'instruments de gestion des risques climatiques

Le CNB et le CCCPR tiennent déjà compte des données climatiques et des charges climatiques connexes dans le cadre du processus de conception, mais cette intégration se fonde sur des données climatiques historiques présumant un climat stationnaire. Les risques qui en découlent sont gérés à l'aide de méthodes de fiabilité, mais comme nous l'avons déjà mentionné dans le présent rapport, ces méthodes ne tiennent pas dûment compte des changements climatiques et des événements météorologiques extrêmes. Les deux documents seront mis à jour dans le contexte des processus utilisés par les organisations responsables de la gestion de ces codes, bien que des comités spéciaux devront probablement être constitués pour assurer une orientation claire du travail sur la résilience climatique. Parallèlement, plusieurs des normes incorporées par renvoi aux codes sont mises à jour par la CSA pour qu'elles comprennent également la gestion des risques climatiques changeants. Ces normes sont principalement axées sur les matériaux, notamment les normes de la CSA sur la maçonnerie, le béton, le bois, le bois lamellé-collé, l'acier, l'aluminium et le verre. Des travaux de mise à jour des normes associées à l'alimentation électrique sont également en cours pour tenir compte des changements climatiques et des conditions météorologiques extrêmes.

La conformité des matériaux de construction en soi au CNB est évaluée par le Centre canadien de matériaux de construction (CCMC). Géré par le CNRC au nom des provinces et des territoires, le CCMC élabore des guides techniques décrivant la façon de mettre à l'essai un produit de construction et il produit des rapports qui décrivent la performance d'un produit évalué avec succès et les limites qui devraient être imposées à son utilisation. Les rapports, accessibles publiquement, sont utilisés par les agents du bâtiment municipaux pour déterminer si un produit particulier est acceptable aux fins d'utilisation dans leur collectivité. À mesure que le CNB traitera des changements climatiques et des conditions météorologiques extrêmes, les exigences d'essais du CCMC seront adaptées pour que les produits de construction répondent aux exigences révisées du CNB. Les produits de construction sont réévalués tous les trois ans, ce qui permet de réexaminer les produits existants au titre de la résilience climatique.

Le *Guide de conception et de gestion des actifs des chaussées* de l'ATC peut fournir une méthode pratique pour mettre à jour les pratiques de conception des routes en tenant compte des impacts climatiques. Ce guide intègre certaines charges climatiques, principalement celles qui affectent la mise en place de la chaussée, mais non celles qui affectent la détérioration à long terme de l'ensemble du réseau routier ou les résultats de conditions météorologiques extrêmes. Toutefois, les risques d'inondation sont traités dans les normes de conception en fonction des courbes IDF, qui devraient être modifiées de manière à mieux s'adapter à un climat en évolution.

Il faudra collaborer davantage avec des parties intéressées afin d'élaborer des démarches appropriées pour la production d'orientations sur les réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées, et les réseaux de transport en commun sur rail. Dans certains cas, il pourrait s'avérer nécessaire d'élaborer des normes spécifiques, tandis que dans d'autres cas, la meilleure option pourrait consister à élaborer des lignes directrices sur les pratiques exemplaires. Les normes de matériaux s'appliquant aux réseaux canadiens d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées sont souvent celles créées par l'American Water Works Association (AWWA), l'American Society for Testing and Materials International (ASTM) ou l'American National Standards Institute (ANSI), et il sera difficile de les modifier. Les normes relatives au transport en commun sur rail sont, comme on l'a vu, propres à chaque réseau. Il pourrait être possible d'élaborer une pratique normalisée de gestion des risques liés aux changements climatiques pour le transport en commun sur rail, mais il faudrait la rédiger de telle sorte que n'importe quelle organisation puisse l'adopter. Les procédures de gestion des inondations sont actuellement appliquées à la conception des réseaux d'eaux pluviales et des réseaux de transport en commun, et peuvent être mises à jour éventuellement par la révision des courbes IDF. D'autres risques climatiques, comme le verglas, ne sont pas bien pris en compte dans les normes de conception existantes.

Un dernier instrument possible pour gérer les risques climatiques est le Devis directeur national (DDN) de la construction au Canada, qui relève également du CNRC. Le DDN sert de référence aux exigences techniques et contractuelles des projets de construction de plusieurs ministères fédéraux, ainsi qu'à certains projets du secteur privé. Ce document de référence bilingue contient environ 780 devis directeurs couvrant non seulement la construction des bâtiments, mais aussi l'infrastructure et les services. Les spécifications du DDN ne traitent pas actuellement de la résilience climatique, mais elles pourraient être mises à jour pour améliorer la résilience dans des domaines non visés par des normes ou codes existants.

9.4 Limites et lacunes

Certaines limites des codes, des normes et des guides canadiens actuels pour les BIPB sont décrites aux sections 9.1 et 9.3. Entre autres questions, d'importants changements au CNB et au CCPR seront nécessaires pour :

- traiter des transformations ou des rénovations de bâtiments existants ou de ponts;
- traiter des limites des méthodes de conception courantes axées sur les aléas climatiques uniformes et élaborer des méthodes axées sur les risques uniformes;
- rendre les codes prospectifs, plutôt qu'uniquement axés sur les risques et les défaillances historiques; et
- s'assurer que les risques climatiques réels sont intégrés aux charges climatiques dans les codes.

Plusieurs autres questions techniques devront être résolues pour aborder intégralement l'enjeu de la résilience climatique :

- Les codes modèles nationaux actuels ne tiennent compte que de la résistance aux charges (résilience statique) et non de la rapidité avec laquelle les bâtiments et les ponts peuvent être réparés pour rétablir leur fonctionnalité après une défaillance (résilience dynamique ou reprise rapide de la fonction). Des mesures dynamiques de résilience devront être élaborées et éventuellement intégrées aux codes, particulièrement en ce qui concerne les BIPB essentiels.

- Une analyse coûts-bénéfices est actuellement requise pour appuyer les modifications aux codes, portant uniquement sur les bénéfiques et les coûts directs. Bien que cette approche s'applique de manière générale aux bâtiments commerciaux et aux ponts conventionnels, elle n'est pas susceptible d'appuyer des modifications aux spécifications des codes visant les bâtiments de protection civile et de risque élevé, et les ponts essentiels. Des dispositions qui tiennent compte des coûts et bénéfiques indirects, particulièrement dans le cas des bâtiments et des infrastructures publics, doivent être intégrées aux codes.
- Les codes actuels portent principalement sur la sécurité et la santé des personnes et leurs dispositions représentent une performance minimale acceptable. La protection des biens et la prestation des services ont une priorité beaucoup plus faible. D'autres lignes directrices sur les pratiques exemplaires pourraient être nécessaires pour traiter du maintien de la fonctionnalité et de la protection des biens que sont les BIPB contre les changements climatiques et les conditions météorologiques extrêmes. Ces lignes directrices supplémentaires revêtent une importance particulière pour les BIPB essentiels.
- Les exigences du CNB pour les grands bâtiments diffèrent de celles pour les maisons (et petits bâtiments). La construction des petits bâtiments ne fait pas toujours appel à des ingénieurs, ce qui signifie que les constructeurs et les concepteurs ont tendance à préférer des exigences prescriptives à des exigences de performance. L'évaluation et la conception d'une approche axée sur le risque sont très difficiles à réaliser dans une démarche prescriptive; les tentatives en ce sens aboutiront souvent à une conception trop ambitieuse et coûteuse. Il faudra élaborer des approches adaptées pour protéger les petits bâtiments contre les changements climatiques et les conditions météorologiques extrêmes.
- Les codes actuels utilisent des méthodes de conception basées sur des aléas climatiques uniformes. Cette approche peut mener à des niveaux de fiabilité faibles et inacceptables dans certaines régions faisant face à un danger climatique spécifique, étant donné que l'utilisation d'aléas climatiques uniformes pourrait engendrer des risques non uniformes partout au pays. Il faut donc explorer l'incidence d'utiliser des méthodes de conception basées sur le risque uniforme.

9.5 Logistique

Le régime de réglementation du Canada pour les BIPB est complexe, ce qui exige de convaincre de nombreuses parties intéressées de la nécessité d'adopter des mesures de résilience climatique. Même le système d'élaboration des codes très bien développé présente d'importants défis logistiques.

- À l'exception du CNPI, le réseau de personnes et d'organisations qui administrent et appliquent les codes nationaux ne traite que de la construction de nouveaux bâtiments. Ils ne traitent pas de l'occupation des bâtiments, de leur entretien ou de la planification communautaire et urbaine pour les bâtiments actuels ou futurs. Un nouveau réseau est nécessaire pour aborder ces enjeux, d'une importance cruciale pour accroître la résilience climatique du parc immobilier existant.
- Les codes modèles nationaux sont publiés selon un cycle de 5 ans. La dernière possibilité de mobiliser les comités techniques à l'égard de quelconques changements techniques est au printemps 2018, en vue de l'édition 2020 du CNB. L'approbation et l'établissement des priorités sont ensuite assujettis à l'apport des provinces, des territoires et des organismes de réglementation pour un élément aussi important que l'intégration de la résilience climatique. Il pourrait donc être nécessaire de viser la pleine mise en œuvre de la résilience climatique dans le CNB pour l'édition de 2025, plutôt que celle de 2020.

10. Évaluation des risques climatiques pour les BIPB

10.1 Contexte

L'évaluation et la gestion du risque de défaillance des systèmes de BIPB sont essentielles à la conception ou à la rénovation de ces systèmes. Le risque est défini comme étant le produit de la *probabilité* d'un événement négatif et des *conséquences* de cet événement négatif. Les systèmes et les composants de BIPB peuvent connaître différents modes de défaillance pendant leur vie utile, y compris la perte totale ou partielle de la tenue en service, de leur fonctionnalité et de leur capacité portante. Les conséquences d'une défaillance peuvent varier considérablement, selon le système de BIPB et le mode de défaillance, et peuvent inclure des décès et blessures, des maladies, la perte de l'actif, la perte de la tenue en service et une vaste gamme de répercussions socioéconomiques. On peut réduire le risque en réduisant la probabilité de défaillance ou les conséquences d'une défaillance, ou les deux.

Les systèmes structuraux des ponts et des bâtiments sont conçus pour assurer la sécurité des personnes et de bonnes conditions de service. Pour assurer la sécurité des personnes, une faible probabilité d'effondrement des BIPB pendant leur vie utile est visée. D'autres types d'infrastructures sont conçus en fonction de normes et de guides mécanistiques et empiriques connus pour produire une faible probabilité de défaillance structurale ou fonctionnelle. Les objectifs d'une conception et d'une rénovation des BIPB visant à protéger contre les changements climatiques sont de réduire au minimum les risques de défaillance tout en maintenant les coûts de construction, d'exploitation et d'entretien à des niveaux acceptables pendant la vie utile de la structure. De manière générale, une vie utile plus longue est spécifiée pour les actifs importants et essentiels, comme les ponts d'importance vitale ou les bâtiments de protection civile. En outre, plus il est difficile et coûteux de remplacer un composant, plus sa vie utile prévue devrait être longue.

Différents niveaux de risque acceptable peuvent être définis dans les codes, les normes ou les guides de conception pour chaque type de nouveaux BIPB, ainsi que dans les directives sur la gestion des actifs pour les systèmes de BIPB existants. Les niveaux de risque acceptables dépendent du type de composant de BIPB, des conséquences de sa défaillance, du niveau de redondance dans le système, des modes de défaillance applicables (ductile avec avertissement ou fragile sans avertissement), et de la qualité prévue de la construction et de l'inspection. L'objectif principal du processus de conception et de rénovation des BIPB soumis aux effets des changements climatiques et de conditions météorologiques extrêmes est donc de maintenir la probabilité de défaillance sous une valeur cible acceptable. Dans le cas des systèmes structuraux de bâtiments et de ponts, l'indice de fiabilité à vie cible se situe entre 3,0 et 4,0, ce qui correspond à des probabilités théoriques de défaillance d'environ 0,02 % à 0,003 % pendant la vie utile de la structure. Des probabilités de défaillance plus faibles ont été utilisées pour les bâtiments et les ponts essentiels.

Les bâtiments et les ponts sont des actifs distincts qui sont conçus à l'aide de codes nationaux qui tiennent compte des risques. En revanche, les routes, les réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées, et les réseaux de transport en commun sur rail ne sont pas régis par des codes de conception nationaux. Ils peuvent plutôt être conçus en fonction de normes locales, nationales ou internationales qui peuvent ou non tenir compte de processus d'évaluation des risques. Des évaluations explicites des risques sont également nécessaires lors de la gestion des actifs pour les bâtiments et les ponts existants.

Diverses méthodes d'évaluation des risques sont en usage pour la conception et la réhabilitation de divers systèmes de BIPB ou sont décrites dans la littérature spécialisée, et vont de simples approches qualitatives ou semi-quantitatives à des approches exhaustives d'évaluation quantitative et probabiliste des risques. L'approche générale est souvent différente pour chaque type de système de BIPB. Plus particulièrement, l'évaluation des risques liés aux routes et aux réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées doit tenir compte de l'organisation de ces derniers en tant que réseaux répartis où des défaillances localisées peuvent se produire sans nécessairement toucher l'ensemble du réseau. Ces réseaux ont souvent des nœuds clés, comme des usines de traitement de l'eau, où une défaillance du service est un problème plus grave qu'ailleurs dans le système, mais ils ont aussi une grande résilience inhérente. Même dans le cas des réseaux d'évacuation des eaux pluviales, les pannes de service sont généralement attribuables à l'incapacité des réseaux de tenir compte des changements météorologiques et climatiques extrêmes, plutôt qu'à une défaillance structurale des réseaux mêmes. Les réseaux de transport en commun sur rail se situent quelque part entre les deux, car ce sont des réseaux répartis, qui sont toutefois plus vulnérables aux défaillances à l'échelle du réseau. Les problèmes d'un appareil de commande d'aiguillage, par exemple, peuvent ne toucher qu'une petite section de voie, tandis qu'un problème d'alimentation électrique touchera une zone plus grande ou l'ensemble du réseau, selon la cause.

10.2 Méthodes actuelles d'évaluation des risques climatiques pour les BIPB

Comme il est mentionné ci-dessus, le CNB et le CCCPR tiennent compte des impacts climatiques en utilisant des données climatiques historiques et des charges climatiques connexes qui supposent un climat stationnaire et ne prennent pas en considération les effets des changements climatiques. De plus, le CNB ne traite actuellement pas des événements météorologiques extrêmes, comme les inondations. L'état actuel de la pratique pour l'évaluation des impacts des changements climatiques sur les BIPB est le protocole du CVIIP élaboré par Ingénieurs Canada. Il s'agit d'un outil d'évaluation qualitative de la vulnérabilité climatique pour les infrastructures publiques. Il a été utilisé pour évaluer un certain nombre de différents types de systèmes de BIPB couvrant tous les sujets abordés dans le présent rapport.

Sur la scène internationale, certains pays travaillent à l'évaluation des risques associés aux changements climatiques, y compris l'Australie, le Royaume-Uni et les États-Unis. En Australie, la norme AS 5334-2013, « Climate Change Adaptation for Settlements and Infrastructure – A Risk-based Approach », (Standards Australia), est conforme à la pratique énoncée dans la norme ISO 31000 (Organisation internationale de normalisation, 2009) sur la gestion des risques. Le gouvernement britannique a élaboré le *UK Climate Change Risk Assessment (CCRA) Evidence Report* (Gouvernement du Royaume-Uni, 2012), qui fournit des outils pour :

- analyser les risques présentés par les changements climatiques au cours des 80 prochaines années;
- établir l'ordre de priorité de ces risques et les comparer; et
- fournir des données probantes pour aider le gouvernement, les entreprises et d'autres organisations à prendre des décisions en matière de politiques et de mesures d'adaptation.

En outre, la législation britannique a exigé l'élaboration de documents sur les risques climatiques pour les principaux secteurs d'infrastructures comme les routes et le réseau de transport sur rail du pays. Aux États-Unis, la Federal Highway Administration a élaboré un guide pour une gestion des actifs de transport axée sur le risque qui met l'accent sur le renforcement de la résilience aux changements climatiques de l'infrastructure de transport par l'entremise d'une gestion efficace des actifs (Federal Highway Administration, 2015). Des efforts sont en cours dans d'autres pays, mais n'ont pas donné lieu à des documents publics.

10.3 Écarts de connaissances

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les méthodes existantes d'évaluation des risques climatiques ne tiennent pas compte des changements climatiques ou sont de nature qualitative. De meilleures méthodes sont nécessaires pour évaluer avec plus d'exactitude les risques liés au climat afin de s'assurer que les risques présumés utilisés dans les codes pertinents sont exacts et acceptables, et pour permettre une meilleure prise de décisions lorsqu'il s'agit d'établir l'ordre de priorité des BIPB qui doivent faire l'objet d'une réhabilitation ou d'un remplacement. De plus, des méthodes rigoureuses d'évaluation quantitative ou semi-quantitative des risques sont nécessaires pour les actifs essentiels et pour faciliter la planification à l'échelle des collectivités en vue de l'adaptation des BIPB aux changements climatiques.

Comme on peut le voir au tableau 6, le résultat final recherché des méthodes d'évaluation des risques dépend du type de BIPB considéré. Les codes de conception des bâtiments et des ponts continueront de comporter des évaluations implicites des risques. Des travaux sont en cours en vue de l'élaboration de meilleures lignes directrices dans le CNB concernant les exigences relatives aux bâtiments existants modifiés ou rénovés, ce qui pourrait se refléter dans l'édition 2025 du CNB. Une fois ces modifications achevées, la rénovation des bâtiments existants les rendra également plus résilients aux changements climatiques. La réhabilitation des ponts est déjà couverte par le CCCPR pour certains types de charges.

Il faudra quand même élaborer des outils pour l'évaluation des bâtiments et des ponts afin de déterminer si leur rénovation ou leur réhabilitation doit être priorisée. L'approche recommandée consisterait à déterminer si les structures doivent être considérées comme essentielles (ponts routiers majeurs, bâtiments de protection civile, bâtiments pouvant recevoir un grand nombre d'occupants, etc.) ou non. Les structures essentielles devraient faire l'objet d'une évaluation quantitative complète des risques dans le cadre d'un examen de la vulnérabilité climatique. D'autres structures pourraient plutôt faire l'objet d'une approche d'évaluation des risques semi-quantitative moins coûteuse, mais toujours rigoureuse. La même approche serait également utilisée pour d'autres types d'infrastructures publiques de base.

Tableau 6 – Approches proposées pour l'évaluation des risques selon le type de bâtiment et d'infrastructure

Type de bâtiment ou d'infrastructure	Implicite dans les codes / normes		Semi-quantitative explicite		Quantitative et probabiliste explicite pour les structures essentielles	
	Nouveaux	Reconstruits	Nouveaux	Existants	Nouvelles	Existantes
Bâtiments	•	•		•		•
Ponts	•	•		•		•
Routes			•	•	•	•
Réseaux d'évacuation des eaux pluviales			•	•	•	•
Réseaux d'évacuation des eaux usées			•	•	•	•

Réseaux d'alimentation en eau potable			•	•	•	•
Réseaux d'alimentation en eau potable / d'évacuation des eaux usées de l'Arctique			•	•	•	•
Réseaux de transport en commun sur rail			•	•	•	•

La mise en œuvre d'évaluations quantitatives plus rigoureuses des risques climatiques nécessite des données climatiques fiables, une compréhension de l'incidence du climat sur les BIPB, une connaissance des conséquences de la défaillance des BIPB et des outils efficaces de gestion des risques. Certaines de ces questions sont abordées dans les sections précédentes du rapport, mais des questions précises liées directement à l'évaluation et à la gestion des risques doivent également être abordées, notamment :

- Conversion des données climatiques en valeurs de charge climatique :
Une fois l'information recueillie sur les effets des changements climatiques et des conditions météorologiques extrêmes, elle doit être convertie en charges climatiques spécifiques pour différents types de BIPB, procurant des valeurs quantitatives pour le risque représenté par différents événements climatiques. Ces données devront être cartographiées à l'échelle du Canada ou converties en charges climatiques spécifiques pour différentes localités, comme c'est actuellement le cas pour le CNB et le CCCPR. La production de valeurs de charge climatique peut exiger l'analyse de différents scénarios d'événements climatiques pour permettre une évaluation adéquate de l'impact des charges climatiques individuelles et de leurs combinaisons connexes avec d'autres charges utilisées pour la conception et la réhabilitation des BIPB.
- Définition des bâtiments et des infrastructures essentiels :
Des définitions normalisées des bâtiments, des ponts et des composants du réseau d'infrastructure qui doivent faire l'objet d'une évaluation quantitative complète des risques sont requises. Ces définitions pourraient être adoptées à partir des définitions existantes ou élaborées par l'initiative BIPBRCC, mais elles doivent tenir compte des impacts climatiques sur les BIPB, des modes de défaillance et des conséquences des défaillances.
- Estimation de la fréquence :
Des outils améliorés sont nécessaires pour estimer la fréquence des événements météorologiques extrêmes afin de déterminer quels phénomènes doivent être intégrés aux charges climatiques de conception.

- **Évaluation de la vulnérabilité et estimation des conséquences :**
Dans les cas où des évaluations explicites des risques sont nécessaires, des méthodes probabilistes d'évaluation de la vulnérabilité et d'estimation des conséquences devraient être élaborées, et devraient intégrer les conséquences économiques, sociales et environnementales indirectes ainsi que les coûts directs.
- **Évaluation des risques :**
Les risques tiennent compte de la probabilité d'un événement et de ses conséquences. Des méthodes appropriées de calcul des risques liés aux événements climatiques et aux BIPB existants doivent être élaborées et validées, tout comme les méthodes d'évaluation des composants essentiels de l'infrastructure réseautée.
- **Examen et élaboration de critères d'acceptation des risques :**
Des mesures visant à réduire les risques sont généralement prises lorsque le niveau de risque dépasse les critères prédéfinis d'acceptation des risques. Les valeurs des critères d'acceptation des risques doivent être élaborées et convenues pour l'évaluation des BIPB existants et pour l'infrastructure réseautée.
- **Outils d'évaluation et de gestion des risques climatiques :**
L'information recueillie et élaborée dans le cadre de l'initiative BIPBRCC doit être intégrée à des outils spécifiques pouvant être utilisés par les propriétaires et les concepteurs des BIPB dans le cadre de leurs stratégies générales de gestion des risques.

11. Analyse coûts-bénéfices du cycle de vie / Analyse des coûts du cycle de vie

11.1 Contexte

L'analyse coûts-bénéfices du cycle de vie (ACBCV) ou l'analyse des coûts du cycle de vie (ACCV) sont les processus qui consistent à comparer le coût total d'un projet de construction ou d'un autre projet pendant toute sa vie utile ou un cycle de vie déterminé aux bénéfices qui en découleront au cours de la même période. Traditionnellement, l'analyse des coûts du cycle de vie ne comprenait que les coûts économiques directs, bien qu'il soit également possible d'inclure les coûts socioéconomiques et environnementaux indirects dans le processus. De même, les bénéfices environnementaux, les coûts évités et les bénéfices sociaux peuvent être intégrés au processus. Ces facteurs additionnels peuvent ensuite être utilisés dans une ACBCV ou une ACCV complète tenant compte de tous les coûts et bénéfices d'un projet donné.

L'ACBCV et l'ACCV peuvent être des processus coûteux en raison de la nécessité de recueillir l'information nécessaire et d'effectuer l'analyse. Elles sont donc particulièrement adaptées à l'évaluation des solutions de rechange, en matière de conception de bâtiments et d'infrastructures, qui répondent à un niveau requis de performance technique, mais dont les coûts initiaux, les coûts d'exploitation et d'entretien, les coûts de perturbation des services et les coûts d'élimination peuvent être différents. Elles sont moins susceptibles d'être utilisées pour des projets de petite envergure, comme la construction d'une maison, mais pourraient par exemple être mises en œuvre pour la conception d'un ensemble résidentiel ou d'infrastructures.

L'utilisation d'une ACBCV ou d'une ACCV pour des bâtiments et des infrastructures est raisonnablement bien documentée (Nishijima, Straub et coll., 2007; Kendall, Keoleian et coll., 2008; Padgett et Tapia, 2013; ASTM International, 2015), mais il y a beaucoup moins d'information disponible sur la façon d'intégrer l'adaptation aux changements climatiques à une ACBCV ou une ACCV. La présente section du rapport traite des pratiques actuelles liées aux ACBCV/ACCV et à la résilience face aux changements climatiques, et cerne les enjeux clés qui doivent être résolus pour que ces analyses soient pleinement mises en œuvre dans un cadre de soutien des décisions relatives à la résilience climatique.

11.2 État des connaissances / État de la pratique

Bien qu'il existe un vaste ensemble de recherches et de pratiques liées à l'établissement des coûts du cycle de vie et un corpus similaire de travaux sur le coût général des changements climatiques (Groupe de travail sur l'économie de l'adaptation au climat, 2009; Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, 2009; Groupe de la Banque mondiale, 2010), il y a eu étonnamment peu de travaux chevauchant les deux disciplines (Kirshen, Ruth et coll., 2008; Larsen, Goldsmith et coll., 2008; Marletto, Johansson et coll., 2012; Federal Highway Administration, 2016). Qu'il s'agisse de l'établissement des coûts généraux du cycle de vie ou de l'examen de l'incidence des changements climatiques, la méthodologie globale des ACBCV/ACCV est toutefois semblable. La méthodologie de base (Groupe de travail sur l'économie de l'adaptation au climat, 2009) consiste à :

- i. déterminer le taux d'actualisation;
- ii. recueillir des données sur les coûts des propriétaires et des utilisateurs, les bénéfices et l'utilisation à vie prévue pour chaque conception;
- iii. calculer la valeur actualisée du coût du cycle de vie de chaque conception;
- iv. déterminer la valeur actualisée des bénéfices découlant de chaque conception pendant son cycle de vie; et
- v. déterminer le rapport coûts-bénéfices pour chaque conception.

Bien que le gouvernement fédéral canadien, par l'entremise d'Infrastructure Canada, exige que les provinces, les territoires et les municipalités entreprennent une ACCV ou une ACBCV pour les projets proposés, l'inclusion de l'adaptation au climat dans l'analyse n'est pas faite de façon uniforme à l'échelle du pays. Certaines administrations ne semblent pas envisager d'adapter leurs plans d'infrastructure, tandis que d'autres (comme l'Ontario et le Québec) exigent l'utilisation de coûts du cycle de vie qui incluent l'adaptation au climat dans le processus de planification. Les territoires du Nord canadien incluent l'adaptation aux changements climatiques dans leurs processus de planification et d'élaboration, tout comme les provinces de l'Atlantique. Le Manitoba est en train de déterminer les pratiques exemplaires pour améliorer la résilience des infrastructures aux changements climatiques, tandis que la Colombie-Britannique encourage ses municipalités à utiliser le protocole CVIIP pour évaluer les besoins d'adaptation au climat (province de la Colombie-Britannique, 2016).

11.3 Limites et écarts de connaissances

Malgré la documentation abondante sur les ACBCV/ACCV, leur utilisation pour la prise de décisions sur la résilience aux changements climatiques se heurte à des limites importantes, dont les suivantes :

- Détermination des coûts et bénéfices appropriés :
Les bâtiments et les infrastructures publiques procurent habituellement des avantages sur des périodes s'étendant sur de nombreuses décennies. Dans certains cas, la même infrastructure de base demeurera en usage pendant un siècle ou plus. Par conséquent, pour déterminer avec exactitude le coût du cycle de vie ou le rapport coûts-bénéfices du cycle de vie au moment de la décision, il faut évaluer et exprimer en termes de valeur actualisée les coûts et les bénéfices attendus au cours de la vie du projet ou d'un horizon de planification particulier. Les méthodes existantes ont toutefois supposé un climat stationnaire. Il faut donc s'employer à déterminer les approches appropriées pour établir une valeur actualisée tenant compte des changements climatiques.
- Détermination de la valeur actualisée nette du projet :
Le calcul de la valeur actualisée nette des diverses options de conception est un autre aspect sur lequel des travaux supplémentaires sont nécessaires. L'analyse porte généralement sur les impacts économiques directs sur le cycle de vie d'un projet, mais les avantages réels peuvent être indirects, environnementaux ou sociaux, et sont souvent difficiles à monétiser. L'intégration de ces derniers facteurs à une ACBCV et à d'autres processus décisionnels est un domaine de recherche continu dans de nombreux secteurs de l'économie.
- Manque de données :
Les difficultés liées à l'obtention des données nécessaires à l'exécution d'une ACBCV ou d'une ACCV sont souvent citées dans la littérature spécialisée. Une ACBCV ou une ACCV exécutées sans une quantité suffisante de données sur les taux de détérioration, les coûts d'entretien, les coûts de défaillance, les coûts de remplacement et les coûts indirects sont susceptibles d'être inexacts, mais la collecte des données est difficile et coûteuse. De nombreux modèles utilisent des hypothèses ou des estimations pour réduire la difficulté des calculs, mais ces hypothèses ne sont pas nécessairement bien fondées, ce qui entraîne également des résultats inexacts.

- Hypothèses de modélisation simplistes :
La plupart des modèles ne tiennent pas compte de la détérioration de l'infrastructure au fil du temps, même s'il a été démontré que cette détérioration influe fortement sur les résultats (Dong et Frangopol, 2016). À la place, une durée de remplacement donnée est souvent attribuée et l'infrastructure est présumée être remplacée au bout de cette période. Les interactions entre la détérioration et des facteurs externes comme le climat sont donc ignorées, ce qui se traduit encore une fois par l'inexactitude d'une ACBCV ou d'une ACCV. En outre, la plupart des modèles mettent l'accent sur les ACBCV/ACCV du bâtiment ou de l'infrastructure seulement. Bien que cette approche simplifie l'analyse, elle peut fortement sous-estimer l'impact de la défaillance structurale ou opérationnelle du système analysé. Des approches permettant d'inclure les interdépendances des systèmes dans les ACBCV/ACCV sont donc nécessaires.

11.4 Besoins en recherche

Les besoins en recherche déterminés au cours de la présente analyse qui sont propres à une ACBCV/ACCV comprennent :

1. une base de données nationale sur la performance des infrastructures en cas d'événements météorologiques extrêmes;
2. des méthodes appropriées pour quantifier les répercussions environnementales, sociales et économiques sur les BIPB pendant leur cycle de vie complet;
3. des méthodes appropriées pour évaluer et prévoir les répercussions microéconomiques et macroéconomiques des changements climatiques et des conditions météorologiques extrêmes sur les BIPB en ce qui concerne l'effet tant sur le propriétaire, les utilisateurs et les occupants que sur les collectivités et les régions avoisinantes;
4. l'élaboration de pratiques exemplaires normalisées pour déterminer les coûts du cycle de vie et les bénéfices pour les BIPB, y compris les répercussions sociales et environnementales;
5. l'élaboration de pratiques exemplaires pour l'actualisation et le calcul de la valeur actualisée nette, menant à des méthodes normalisées qui peuvent être utilisées pour inclure avec exactitude les répercussions futures potentielles des changements climatiques et des conditions météorologiques extrêmes dans le processus décisionnel actuel;
6. des outils pour intégrer les répercussions des facteurs externes et des interdépendances des actifs sur les ACBCV/ACCV, comme l'avantage qu'un réseau amélioré d'évacuation des eaux pluviales aurait pour la résistance aux inondations des routes ou du réseau de transport en commun sur rail; et
7. des pratiques exemplaires intégrant une durée de vie fondée sur la performance à l'ACBCV/ACCV afin d'en améliorer l'exactitude.

12. Analyse du cycle de vie

12.1 Contexte

L'analyse du cycle de vie (ACV) quantifie les impacts environnementaux potentiels d'un produit ou d'un service sur son cycle de vie complet, du berceau à la tombe. Ces impacts incluent des aspects comme l'utilisation de l'énergie, le transport, la pollution par les sous-produits de la fabrication et le mode d'élimination, ainsi que les impacts directs de la fabrication. L'ACV est un outil particulièrement important pour évaluer et réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES), car elle permet au concepteur, au propriétaire et/ou au gestionnaire de BIPB de suivre la quantité de GES produite pour construire ou rénover les BIPB et de déterminer où des réductions importantes sont possibles.

L'importance de tenir compte de l'ACV dans les projets de construction et leur résultat s'explique par la taille de l'industrie de la construction. Le secteur de la construction est à lui seul le troisième plus important émetteur de GES au pays et il représentait environ 12 % des émissions totales au Canada en 2014 (Environnement et Changement climatique Canada, 2017). La construction et l'exploitation d'infrastructures publiques ajoutent à ce total.

Toutefois, l'utilisation d'une ACV pour déterminer les émissions de GES n'est qu'un des facteurs dont il faut tenir compte pour décider d'une stratégie d'adaptation climatique. L'objectif est de choisir des solutions d'adaptation rentables qui réduisent les risques liés aux changements climatiques et aux conditions météorologiques extrêmes tout en réduisant au minimum les émissions de GES. Une fois une ACV effectuée, les émissions de GES peuvent être traitées comme un coût dans une ACBCV ou une ACCV, les bénéfices de la réduction de la pollution pouvant être monétisés et intégrés à ces dernières.

La présente section porte sur le statut actuel des ACV du point de vue de leur application aux bâtiments et aux infrastructures résilients aux changements climatiques. En plus de donner un aperçu de la pratique actuelle, elle cerne les écarts de connaissances qu'il importe de combler. On y formule également des recommandations pour l'intégration de l'ACV au cadre de soutien des décisions touchant l'initiative BIPBRCC.

12.2 Modèle d'ACV

Le cadre de travail le plus couramment utilisé pour les ACV se trouve dans les normes ISO-14040 (2006a) et ISO-14044 (2006b) de l'Organisation internationale de normalisation, qui ont été largement adoptées dans divers domaines, dont la construction. La figure 12 montre les quatre étapes de l'exécution d'une ACV.

L'étape de définition du but et de la portée inclut une définition des raisons de l'étude, de l'application prévue et du public visé. Elle décrit également les limites de l'étude et définit l'unité fonctionnelle de mesure pour laquelle l'analyse sera effectuée (c.-à-d. par kilomètre de route urbaine à deux voies ou par mètre cube d'eau potable traitée).

L'analyse de l'inventaire du cycle de vie (ICV) est une compilation de tous les intrants (ressources) utilisés et extrants (émissions) générés par le produit ou le système analysé durant son cycle de vie, mesurés par unité fonctionnelle. Dans un système complexe, comme un bâtiment ou une infrastructure, l'inventaire doit inclure tous les composants utilisés dans la construction du système. L'ICV est au cœur d'une ACV, car il est

important de s'assurer que les données représentent la réalité, ce qui influe à son tour fortement sur la valeur des résultats de l'ACV. De nombreuses bases de données ICV ont donc été mises au point pour simplifier le processus de détermination des intrants et des extrants liés à un produit, à un bâtiment ou à un système d'infrastructure. La base de données ICV des États-Unis (National Renewable Energy Laboratory, 2012) et la base de données ecoinvent de la Suisse (ecoinvent, 2017) sont deux bases de données largement utilisées. Les ICV doivent toutefois tenir compte de la disponibilité locale des matériaux, des sources d'énergie et des coûts de transport. Par conséquent, l'absence d'une base de données nationale nuit à la qualité globale des ACV canadiennes.

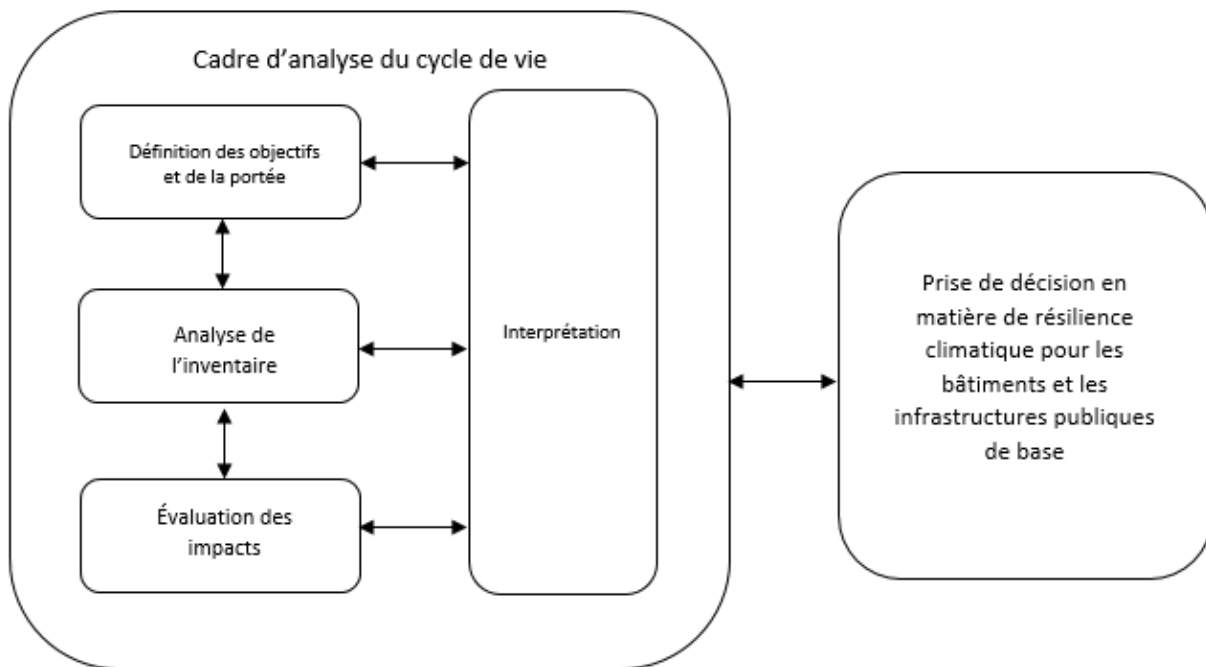


Figure 12 – Étapes d'une ACV (selon ISO 2006b)

L'étape de l'analyse des impacts du cycle de vie convertit ensuite les résultats de l'ICV en impacts environnementaux réels. Les impacts couramment utilisés en Amérique du Nord sont habituellement regroupés comme suit :

- consommation d'énergie par catégorie de source;
- consommation de matières renouvelables et non renouvelables, y compris l'eau;
- émission d'unités atmosphériques par type de dommage potentiel; et
- émission de déchets solides dangereux et non dangereux.

Enfin, durant la phase d'interprétation, les résultats des phases précédentes sont évalués, et des conclusions et recommandations sont formulées.

Bien que les normes ISO fournissent le cadre de base de l'ACV, il existe un certain nombre de variations dans l'approche adoptée pour l'analyse. Ces variations incluent les stades du cycle de vie envisagés, le type de données utilisées et la question de savoir si l'analyse est fondée sur l'état actuel de l'inventaire du cycle de vie ou si elle vise à aider à déterminer ce qui se produirait à l'avenir dans différents scénarios. Du travail reste à faire pour déterminer le type d'ACV qui convient le mieux au cadre de soutien des décisions concernant l'initiative BIPBRCC.

12.3 État de la pratique en matière d'ACV

L'ACV des bâtiments est devenue plus courante depuis que l'American Institute of Architects (AIA) a reconnu pour la première fois son utilisation dans la pratique architecturale dans les années 1990. Parmi les exemples importants, mentionnons l'utilisation indirecte de certaines mesures d'ACV dans le système d'évaluation LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) pour les nouveaux bâtiments (Conseil du bâtiment durable du Canada, 2017), l'International Green Construction Code (IgCC) pour les systèmes de construction (International Code Council, 2015), la norme ASHRAE 189.1 (ASHRAE, 2014), le California Green Building Standards Code (California Building Standards Commission, 2016) et la norme ASTM E2921-16a (ASTM, 2016). Même si l'IgCC et le code californien ne s'appliquent pas au Canada, le programme LEED est un système d'évaluation très couramment utilisé pour promouvoir la qualité des bâtiments, et les normes ASHRAE et ASTM sont utilisées en fonction des besoins par les ingénieurs et les architectes canadiens.

Les chaussées sont un autre aspect pour lequel une ACV a été utilisée, d'abord en Finlande (Häkkinen et Mäkelä, 1996) et aux États-Unis (Horvath et Hendrickson, 1998). Des ACV ont été utilisées fréquemment partout en Amérique du Nord pour évaluer la performance des chaussées, parfois en conjonction avec la législation visant à réduire l'impact des chaussées sur l'environnement. La Belgique a récemment commencé à utiliser des ACV dans le cadre de ses spécifications sur les chaussées. Au Canada, les ministères des Transports de l'Ontario (Chan, Bennett et coll., 2013) et du Québec (Collette, 2012) considèrent les ACV et les ACBCV/ACCV comme des outils de base pour le choix des types de chaussée à utiliser dans un projet.

Bien que des ACV soient utilisées depuis longtemps pour les chaussées comparativement à d'autres types d'infrastructures, des travaux récents semblent indiquer qu'il existe des problèmes importants dans la façon dont elles ont été appliquées par le passé. Il faudra donc travailler davantage à mettre au point un système complet d'ACV pour les chaussées. Les ACV pour les ponts et les réseaux de transport en commun sont beaucoup moins courantes, et il faudra en faire davantage pour les élaborer si des ACV doivent être intégrées à un système de soutien des décisions en matière de résilience climatique de ces types d'infrastructures. Les ACV pour les réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées sont un peu plus courantes, mais elles s'appliquent généralement aux composants du réseau, comme les canalisations d'eau, plutôt qu'aux réseaux entiers.

Enfin, il convient de noter que les ACV ont généralement été appliquées aux nouvelles constructions et non aux projets de réhabilitation. Les travaux de réhabilitation et de rénovation sont généralement limités par les matériaux et les réseaux existants, qui doivent être pris en compte. L'intégration de l'ACV au processus de réhabilitation est un autre point sur lequel il faut poursuivre la recherche et le développement.

12.4 Écarts de connaissances et besoins en recherche

Trois grands obstacles pourraient empêcher l'utilisation efficace des ACV dans la conception et la rénovation de BIPB résilients aux changements climatiques. Pour surmonter chaque obstacle, de la recherche sera nécessaire. Les besoins en recherche incluent les suivants :

1. Résultats des ACV fiables et fondés sur des données probantes :
Les méthodes actuelles d'ACV ont une exactitude limitée pour le Canada en raison de l'absence d'une base de données d'ICV propre au Canada. L'élaboration d'une base de données nationale en matière d'ICV est nécessaire pour tenir compte avec exactitude des impacts environnementaux des produits fabriqués ou utilisés dans les bâtiments et les infrastructures canadiens. Parallèlement, même une base de données nationale canadienne présentera une incertitude inhérente dans les données d'ICV en raison de la qualité des données, de la conception des modèles et des facteurs propres aux projets. Une méthodologie doit être élaborée pour tenir compte de ces incertitudes et permettre la traduction rapide des données existantes dans le contexte canadien.

2. Approches pratiques en matière d'ACV :

Les ACV sont coûteuses en soi en raison de la grande quantité de données qui doivent être analysées pour produire une évaluation exacte. Des approches techniques pratiques sont nécessaires pour réduire les coûts et le temps associés aux ACV tout en maintenant une exactitude acceptable. De plus, des études de cas rigoureuses sont nécessaires pour démontrer la valeur des ACV, en particulier dans les cas où le choix de la solution de rechange la plus respectueuse de l'environnement peut se traduire par des coûts de projet plus élevés ou par une performance différente.

3. Préviation de la performance au cours du cycle de vie / durée utile des BIPB :

Il est essentiel de connaître la performance au cours du cycle de vie ou la durée utile d'un composant d'un bâtiment ou d'une infrastructure publique pour assurer l'exactitude de l'ACV. De meilleures techniques sont nécessaires pour prévoir la vie utile des infrastructures publiques et des bâtiments nouveaux et existants, y compris des méthodes stochastiques bien étayées pour tenir compte de l'incertitude inhérente aux prévisions de la vie utile. Ces méthodes doivent inclure la capacité de tenir compte du prolongement de la vie utile offert par les méthodes de réhabilitation, de sorte que la décision de remplacer ou de réhabiliter un bâtiment ou une infrastructure est prise en tenant compte des impacts environnementaux du cycle de vie.

Un quatrième domaine de recherche est essentiel pour déterminer avec exactitude les coûts environnementaux réels de l'absence d'entretien des BIPB.

4. Répercussions environnementales de la défaillance d'un BIPB :

Une ACV standard tient compte de l'évaluation normale du cycle de vie du BIPB du berceau à la tombe. Cependant, les défaillances structurales et opérationnelles des bâtiments et des infrastructures ont leurs propres impacts négatifs sur l'environnement. Les débordements d'égouts combinés, surchargés par les eaux pluviales, sont l'exemple le plus évident, mais le remplacement d'une route endommagée par une inondation ou de pylônes électriques endommagés par une tempête de verglas peut aussi être un exemple de cas où une défaillance structurale produit des impacts environnementaux directs et indirects. Des méthodes probabilistes doivent être élaborées pour tenir compte des avantages supplémentaires fournis par des BIPB résilients aux changements climatiques. Dans le même ordre d'idées, des travaux sont nécessaires pour comprendre l'impact environnemental d'une défaillance de BIPB attribuable à des événements météorologiques extrêmes, ce qui peut aider à évaluer la nécessité de mesures de prévention ou d'atténuation améliorées.

13. Cadre pour le soutien des décisions fondées sur le risque pour les bâtiments et les infrastructures publiques de base résilients aux changements climatiques

13.1 Contexte

La compréhension des effets des changements climatiques sur les BIPB et l'élaboration de stratégies d'adaptation à ces effets exigent habituellement des approches complexes à facettes multiples combinant différents domaines d'expertise et d'activité. Par conséquent, des plans-cadres fournissant une stratégie d'ensemble accompagnée de mesures précises pour atteindre les objectifs définis ont généralement été adoptés pour gérer les impacts des changements climatiques. Il existe des cadres pour composer avec l'adaptation aux changements climatiques à différents niveaux allant du niveau global à un niveau très local, et des activités d'un pays à celles d'un secteur ou d'une organisation donnée. De manière générale, plus la portée d'un cadre de lutte contre les changements climatiques est grande, plus le sujet est d'application globale et plus l'impact potentiel est grand. Comme nous l'avons mentionné précédemment, le Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques (2016) comprend quatre piliers :

- la tarification de la pollution par le carbone;
- des mesures complémentaires touchant le climat;
- l'adaptation et la résilience climatiques; et
- les technologies propres, l'innovation et l'emploi

De la même manière, les grandes villes et les grandes entreprises ont des cadres de gestion des enjeux liés aux changements climatiques.

Les cadres d'adaptation au climat peuvent être de nature générale ou spécifique. Warren et Lemmen (Warren et Lemmen, 2014) ont présenté un exemple de cadre général qui proposait un processus d'adaptation climatique en sept étapes :

1. la sensibilisation aux changements climatiques;
2. la sensibilisation au besoin d'adaptation;
3. la mobilisation des ressources;
4. le renforcement de la capacité d'adaptation;
5. la mise en oeuvre de mesures d'adaptation ciblées;
6. la mesure et l'évaluation des progrès réalisés; et
7. l'apprentissage, le partage des connaissances et l'ajustement.

En revanche, il existe des cadres plus spécifiques d'adaptation aux effets des changements climatiques qui reposent sur des principes de gestion des risques. Comme il est indiqué à la section 10, le risque est défini comme étant le produit de la *probabilité* d'un événement négatif et des *conséquences* de cet événement négatif. Comme nous l'avons mentionné précédemment, le risque peut être décrit en termes qualitatifs, semi-quantitatifs ou quantitatifs sous forme de descriptions subjectives, de cotes ou dans un format probabiliste, respectivement.

Le cadre le plus couramment utilisé pour évaluer les risques climatiques au Canada est le protocole CVIIP. L'Association of Professional Engineers and Geoscientists de la Colombie-Britannique a élaboré des lignes directrices en vue de l'élaboration de conceptions résilientes aux changements climatiques pour l'infrastructure routière en Colombie-Britannique (APEGBC, 2016). Le ministère des Affaires municipales et du Logement de l'Ontario a élaboré un guide fondé sur les risques à l'intention des municipalités ontariennes (Enger et coll., 2006), tandis qu'un manuel intitulé *Climate Change Adaptation Framework* a été élaboré pour le ministère du Développement durable des ressources de l'Alberta (Alberta Sustainable Resource Development, 2010). L'Australie a élaboré une norme sur l'adaptation aux changements climatiques intitulée *Climate Change Adaptation for Settlements and Infrastructure – A Risk-Based Approach* (Standards Australia, 2013). Le Royaume-Uni a élaboré des cadres d'adaptation aux changements climatiques pour les routes (UK Highways Agency, 2009), les chemins de fer (Arup T1009 Phase 2 Consortium, 2016) et d'autres infrastructures à la suite d'une loi du Parlement exigeant de tels documents des organismes publics. La Federal Highway Administration (FHWA) des États-Unis a également mis au point un guide d'adaptation aux changements climatiques pour les réseaux de transport intitulé *Climate Change Adaptation Guide for Transportation Systems Management, Operations and Maintenance* (Federal Highway Administration, 2015). Ces cadres sont généralement conformes à la pratique énoncée dans la norme ISO 31000 (Organisation internationale de normalisation, 2009), sous réserve de quelques modifications mineures seulement. Typiquement, ces cadres incluent les éléments suivants (Wall et Meyer, 2013) :

1. Établissement du contexte :
 - Définir les buts et les objectifs, établir l'inventaire des BIPB et recueillir les données climatiques projetées.
2. Détermination des risques :
 - Cerner les risques pertinents liés aux changements climatiques et déterminer les conséquences probables des impacts climatiques.
3. Analyse des risques :
 - Attribuer des cotes qualitatives ou semi-quantitatives aux aléas et aux impacts;
 - Dans certains cas, des critères plus complexes sont utilisés pour faciliter l'analyse.
4. Évaluation des risques :
 - Classer les résultats de l'analyse des risques pour déterminer les priorités d'adaptation.
5. Traitement des risques :
 - Élaborer, sélectionner et mettre en œuvre des mesures d'adaptation.

13.2 Écarts de connaissances et limites

Un examen des cadres actuels de lutte contre les changements climatiques montre que ces cadres présentent de sérieuses limites dans leur mise en œuvre, ce qui pourrait nuire à leur efficacité. Les problèmes communs incluent (Wall et Meyer, 2013; Lounis et McAllister, 2016) :

- une absence ou une disponibilité limitée de données sur des paramètres de conception tenant compte des changements climatiques;
- une absence ou une disponibilité limitée de données sur l'état et la performance durant le cycle de vie des systèmes des BIPB;
- des incertitudes dans la projection des facteurs des changements climatiques;
- des incertitudes dans les modèles climatiques existants en raison de la complexité et de la variabilité du climat terrestre, et de l'absence de modèles qui fonctionnent à l'échelle locale et régionale;

- des charges et une résistance climatiques stationnaires présumées pour les systèmes de BIPB, alors que l'on s'attend à ce que tant les charges que la résistance varient avec le temps et puissent mener à une sous-estimation de la probabilité de défaillance des BIPB (figure 13);
- l'utilisation de probabilités de survenance des aléas uniformes lors de la spécification des données climatiques théoriques, plutôt que de probabilités de risque uniforme, ce qui pourrait faire en sorte que certaines régions du pays présentent des niveaux de risque plus élevés que requis;
- l'utilisation d'approches qualitatives ou semi-quantitatives lors de l'évaluation des risques dans la plupart des codes de conception, des normes et des guides, tandis que dans la réalité, la conception des structures repose sur la théorie de la fiabilité utilisant une approche probabiliste;
- la détermination des risques dans les codes actuels ne tient pas compte des interdépendances entre différents systèmes;
- les cadres existants ne tiennent pas compte des effets secondaires causés par la défaillance d'un actif, même lorsque ces effets ont un impact beaucoup plus important que les effets directs.

Il importe de prendre en considération ces limites pour mettre en œuvre un cadre complet d'adaptation aux changements climatiques.

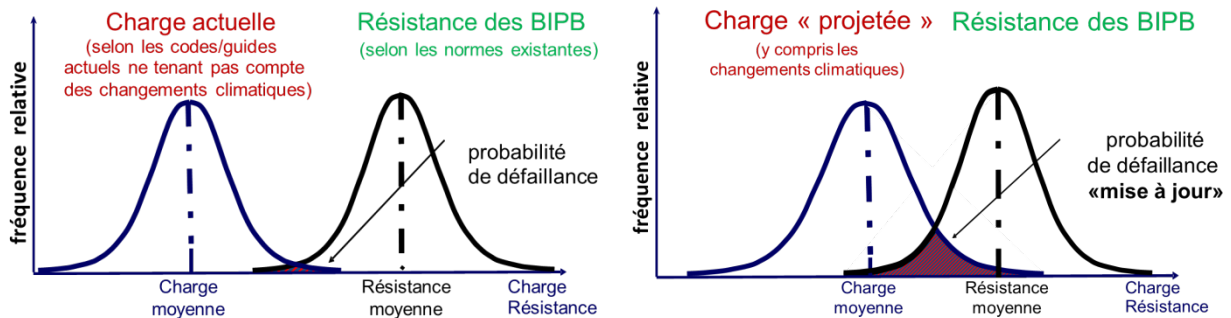


Figure 13 – Modélisation de l'impact des changements climatiques sur la probabilité de défaillance d'un système

13.3 Aperçu du cadre de soutien à la décision axé sur le risque pour les bâtiments et les infrastructures publiques de base résilients aux changements climatiques

Le cadre de soutien à la décision proposé pour élaboration dans le cadre de l'initiative BIPBRCC cerner les fondements, les structures, les modèles et les outils qui permettront aux décideurs d'intégrer systématiquement l'adaptation aux changements climatiques à la conception de nouveaux actifs et à la gestion de leurs actifs existants. Il se compose des éléments suivants (figure 14) :

- objectifs;
- aléas climatiques;
- adaptation aux changements climatiques fondée sur le risque;
- analyse du cycle de vie (ACV);
- ACBCV ou ACCV des mesures d'adaptation aux changements climatiques; et
- suivi de la performance.

Le résultat global du cadre sera des BIPB et des collectivités résilients aux changements climatiques. Chaque élément de base sera traité plus en détail ci-dessous.

13.3.1 Objectifs

La résilience des collectivités canadiennes aux changements climatiques dépend de la résilience des actifs qui fournissent des services de base, comme l'hébergement, le transport des personnes et des biens, l'eau potable, l'enlèvement des déchets ainsi que les services de santé et d'urgence. La résilience peut toutefois faire référence à différents concepts et capacités. Dans le cas du cadre décisionnel proposé par l'initiative BIPBRCC, la résilience renvoie à l'atteinte de certains objectifs clés durant les événements météorologiques extrêmes et sous l'influence des changements climatiques (Lounis et McAllister, 2016). Ces objectifs pourraient comprendre :

- la sécurité publique (p. ex., solidité structurale des BIPB);
- la santé publique (p. ex., fonctionnement continu des réseaux d'égouts);
- la fonctionnalité (p. ex., capacité des véhicules de traverser un pont à la vitesse prévue);
- la tenue en service (p. ex., la capacité de prévenir ou de limiter les dommages à un pont);
- la durabilité (p. ex., la résistance au vieillissement provoqué par le climat);
- des infrastructures vertes/à faible empreinte carbone (visant à optimiser les impacts environnementaux des décisions); et
- la rentabilité.

La première étape de l'utilisation du cadre consiste à définir quels aspects de la résilience climatique seront couverts par les travaux à entreprendre. L'initiative actuelle couvrira tous les domaines susmentionnés, bien que l'accent sera moins mis sur les infrastructures vertes, par exemple, que sur la santé et la sécurité publiques.

13.3.2 Aléas climatiques

Le cadre requiert de l'information sur les charges climatiques futures attribuables aux changements climatiques et aux phénomènes météorologiques extrêmes. Cette information sera élaborée au cours de l'initiative, en commençant par les données climatiques relatives à des aléas climatiques connus, lesquelles données seront converties en charges climatiques pour utilisation dans l'analyse des risques. Une fois élaborée, l'information sera intégrée aux autres parties du cadre.

13.3.3 Adaptation aux changements climatiques fondée sur le risque

Les protocoles d'adaptation des BIPB pour réduire au minimum les risques de défaillance en raison des changements climatiques sont les composants clés du cadre. Pour déterminer les risques, il faut combiner les mesures stochastiques de la performance des systèmes de BIPB dans le contexte d'un climat en évolution avec les distributions de probabilité de survenance de différents types de charges climatiques futures et les conséquences de la défaillance des systèmes. Une fois ces risques déterminés, des mesures peuvent être prises pour réduire au minimum les risques et réduire les préjudices qui pourraient découler des changements climatiques. Outre le processus d'évaluation des risques, deux autres outils importants sont nécessaires. Le premier est la modification des codes, des normes et des lignes directrices existants pour les BIPB de façon à tenir compte d'un climat non stationnaire en prenant en considération les données climatiques projetées pour la conception, et en élaborant les charges climatiques correspondantes et les combinaisons de charges. Ainsi, les BIPB fourniront une performance acceptable au cours de leur vie utile en fonction des effets des nouvelles charges climatiques et des combinaisons de charges connexes.

Différentes approches seront adoptées selon qu'il existe ou non des codes nationaux qui régissent le type de BIPB examiné. Le CNB et le CCCPR fournissent des normes minimales de performance par l'entremise d'une conception des structures axée sur la fiabilité. Suivant les approches existantes, l'impact probabiliste des changements climatiques et des phénomènes météorologiques extrêmes sur les charges climatiques sera d'abord évalué puis simplifié en une approche de conception déterministe par l'introduction de facteurs de charge et de résistance permettant d'obtenir des probabilités acceptables de défaillance au cours de la vie utile. Ces facteurs tiendront compte de l'incertitude entourant les charges et la résistance des matériaux, des facteurs de biais, de l'indice de fiabilité cible et des approximations de modélisation généralement acceptées en analyse structurale. Un aperçu du processus de conception qui en découle, y compris les aspects pour lesquels l'analyse coûts-bénéfices liée au cycle de vie et à l'environnement ou l'analyse des coûts liés au cycle de vie entrent en jeu, est présenté à la figure 15.

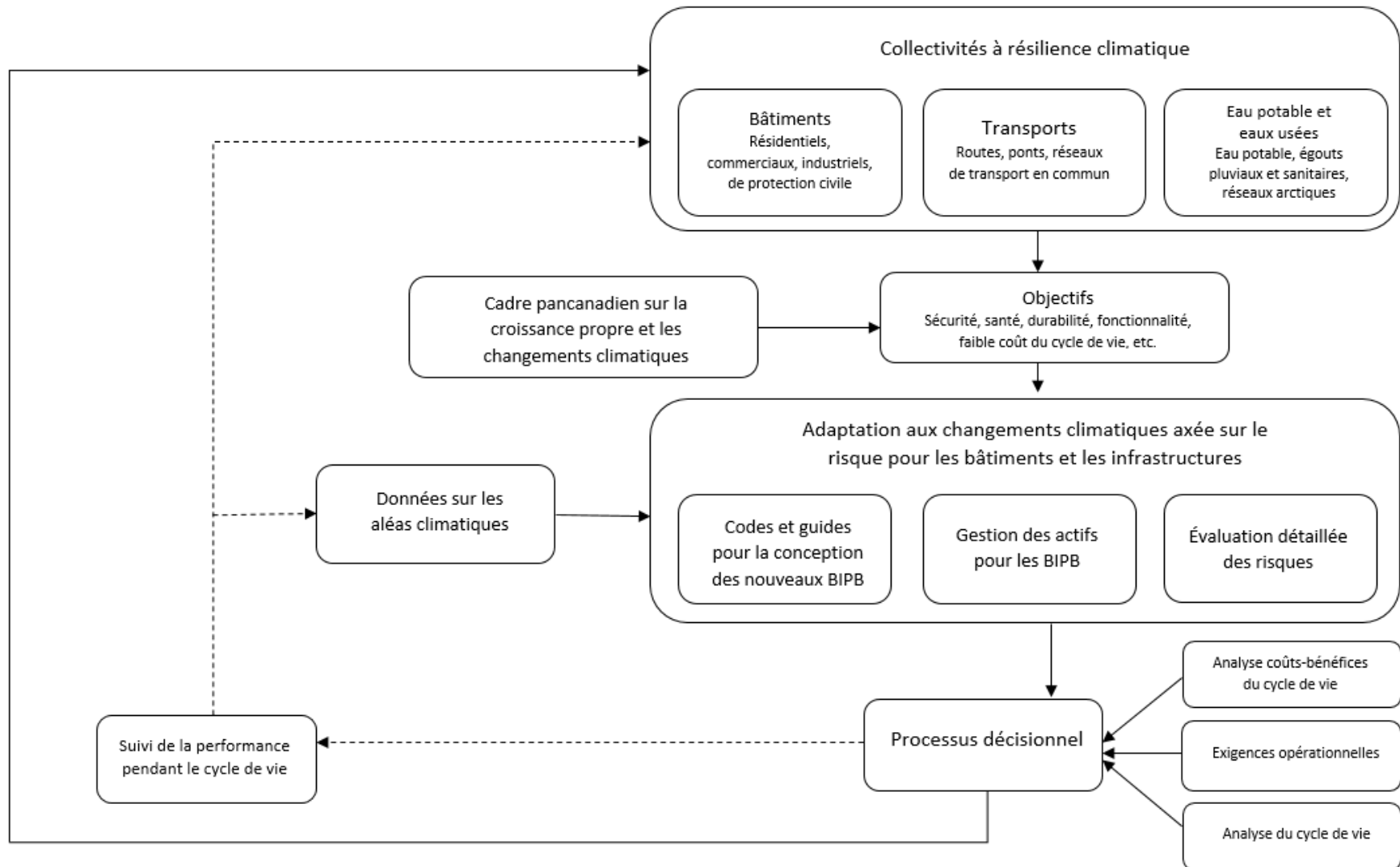


Figure 14 – Cadre de soutien à la décision axé sur le risque pour les bâtiments et les infrastructures publiques de base résilients aux changements climatiques

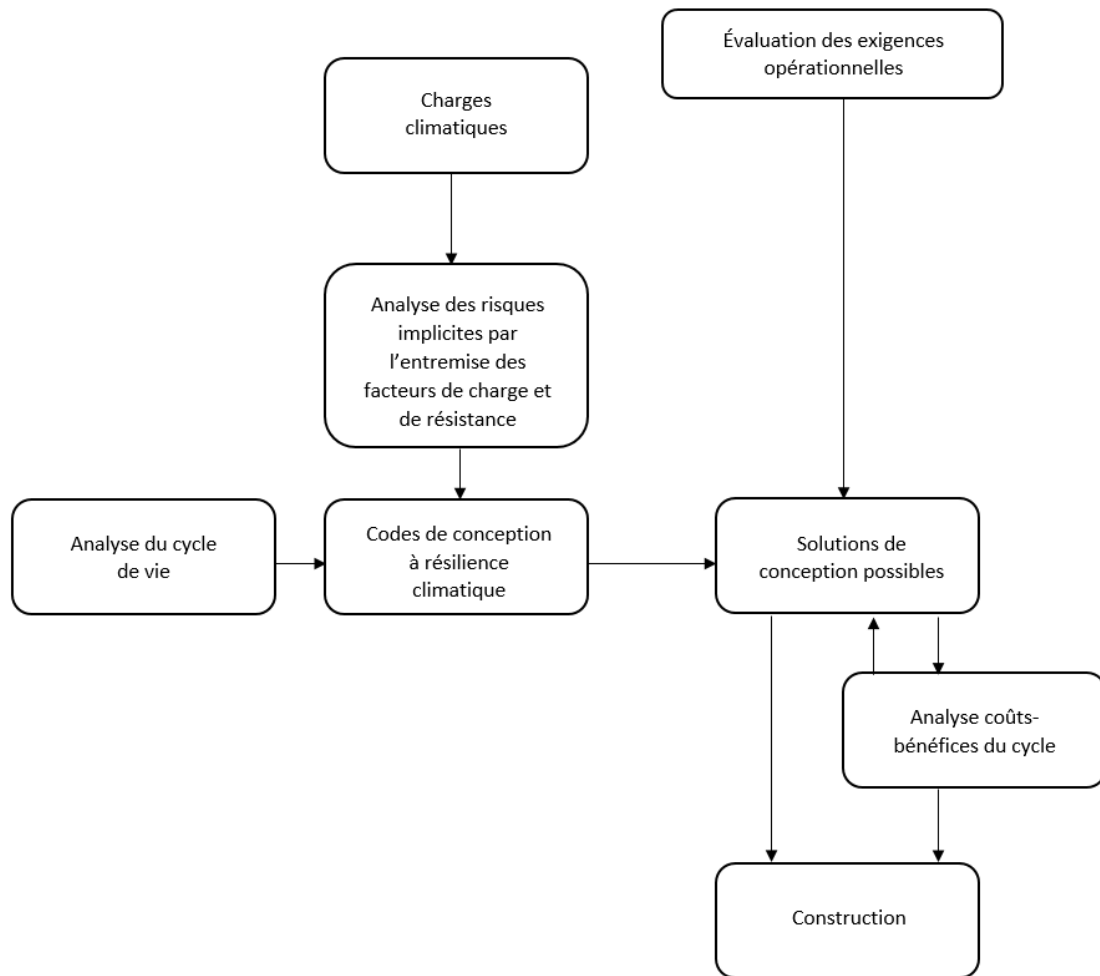


Figure 15 – Conception minimale acceptable fondée sur les codes nationaux pour les bâtiments et les ponts résilients aux changements climatiques

Dans bien des cas, toutefois, une conception simple en fonction de normes minimales peut ne pas être adéquate. La conception minimale acceptable satisfait aux impératifs de sécurité des personnes et entraîne les coûts initiaux les plus bas, mais lorsque les coûts et les bénéfices du cycle de vie sont pris en compte, d'autres processus de conception plus complexes peuvent produire de meilleures solutions (figure 16). Ce dernier type de conception est mis de l'avant dans les lignes directrices sur les pratiques exemplaires, par opposition aux exigences minimales des codes nationaux. Une différence clé réside dans le fait que les risques sont évalués explicitement au moyen de méthodes semi-quantitatives ou de méthodes quantitatives probabilistes rigoureuses. Les outils décisionnels axés sur les risques qui en découlent peuvent inclure des modèles d'évaluation de la vulnérabilité, d'analyse de la fragilité, et d'évaluation de la probabilité et du risque de défaillance. Ces renseignements peuvent ensuite servir à prendre des décisions de conception plus rigoureuses. L'évaluation quantitative des risques coûte beaucoup plus cher que les méthodes semi-quantitatives et est donc plus susceptible d'être utilisée pour les BIPB essentiels.

Le dernier composant clé du module d'adaptation aux changements climatiques axée sur les risques du cadre de travail consiste en des lignes directrices sur la gestion des actifs des systèmes existants de BIPB en vue d'en accroître la résilience climatique. La gestion des BIPB existants présente trois autres défis, outre ceux qui sont intégrés à la conception des nouveaux BIPB :

- i. L'état ou la résistance d'un système existant et vieillissant sont généralement inférieurs à ceux d'un nouveau système et l'incertitude qui y est associée est habituellement plus élevée.
- ii. Les décisions reposent sur une prévision de la durée de vie restante des actifs, ce qui est généralement difficile à déterminer selon une exactitude raisonnable en raison des incertitudes connexes.
- iii. Le coût de mise à niveau des systèmes existants pour en permettre la résistance aux nouvelles charges climatiques est beaucoup plus élevé que le coût d'inclusion des mesures requises à la conception et à la construction d'un nouveau système.

La probabilité acceptable de défaillance pour les BIPB existants peut toutefois être beaucoup plus élevée que pour les nouveaux systèmes. Des facteurs comme des durées de vie prévues réduites, les conséquences des défaillances, la redondance du système, et la qualité de l'inspection et de la surveillance des risques influenceront sur la façon dont la probabilité acceptable de défaillance est choisie. La sélection des meilleures options de gestion dépendra donc de l'ACBCV ou de l'ACCV et, peut-être, d'une analyse du cycle de vie de toutes les solutions de rechange possibles. Le processus de gestion des actifs en cours d'élaboration dans le cadre de l'initiative BIPBRCC est illustré à la figure 17. Dans le cadre de l'initiative actuelle, des guides de gestion des actifs intégrant les changements climatiques seront élaborés ou révisés pour les bâtiments, les ponts, les routes, les réseaux de transport en commun, et les réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées. À l'instar des pratiques de conception exemplaires, des méthodes plus perfectionnées d'évaluation des risques peuvent être utilisées dans le cadre de la gestion des actifs pour améliorer la prise de décisions, y compris l'établissement de l'ordre de priorité des actifs pour l'adaptation aux changements climatiques.

13.3.4 Analyse du cycle de vie et analyse coûts-bénéfices du cycle de vie

Le choix des stratégies d'adaptation aux changements climatiques les plus rentables pour les BIPB nouveaux ou existants dépend de l'évaluation des coûts et bénéfices du cycle de vie, ainsi que des impacts sur l'environnement. Une telle évaluation exige la prévision de la vie utile du système vieillissant à mesure que le climat change. Dans l'estimation des coûts, il importe de prendre en compte les coûts directs et indirects, y compris les coûts de la perturbation des services causée par la défaillance des actifs et les coûts des répercussions macroéconomiques sur les activités humaines qui stimulent le commerce et la productivité, et qui soutiennent le développement économique de la collectivité, de la région ou du pays. Dans de nombreux cas, les mesures d'adaptation qui ne semblent pas financièrement souhaitables lorsque seuls les coûts directs sont inclus peuvent être le choix optimal une fois les coûts indirects des défaillances de service sont intégrés à l'analyse. L'analyse du cycle de vie est également essentielle pour estimer les coûts environnementaux des différentes solutions et s'assurer qu'une mesure apparemment rentable n'aura pas d'impact négatif significatif sur l'environnement.

13.3.5 Suivi de la performance

La gestion continue des actifs doit inclure un suivi pendant toute la vie utile du bâtiment ou de l'infrastructure. Dans le cadre de ce processus, il faut non seulement s'assurer d'une performance adéquate à long terme en cernant les problèmes dès le début, mais aussi produire de plus amples renseignements sur l'incidence des changements climatiques sur les BIPB aux fins de l'amélioration des modèles et des décisions de conception ainsi que pour utilisation dans les cycles subséquents de gestion des actifs.

13.4 Mise en œuvre du cadre de soutien à la décision

Le cadre décrit ici est d'abord mis en œuvre dans le cadre de l'initiative BIPBRCC pour couvrir l'évolution des charges climatiques liées aux bâtiments, aux ponts, aux égouts d'eaux pluviales et combinés, aux routes et aux réseaux de transport en commun sur rail. Des domaines de travail spécifiques sont décrits dans les autres sections du rapport. D'autres types d'infrastructures ont également été analysés, mais ils ne s'inscrivent pas dans la portée de l'initiative actuelle ou l'impact des effets des changements climatiques sur eux ne sera pas aussi important. Le cadre est toutefois suffisamment souple pour permettre l'inclusion d'autres actifs et services à l'avenir.

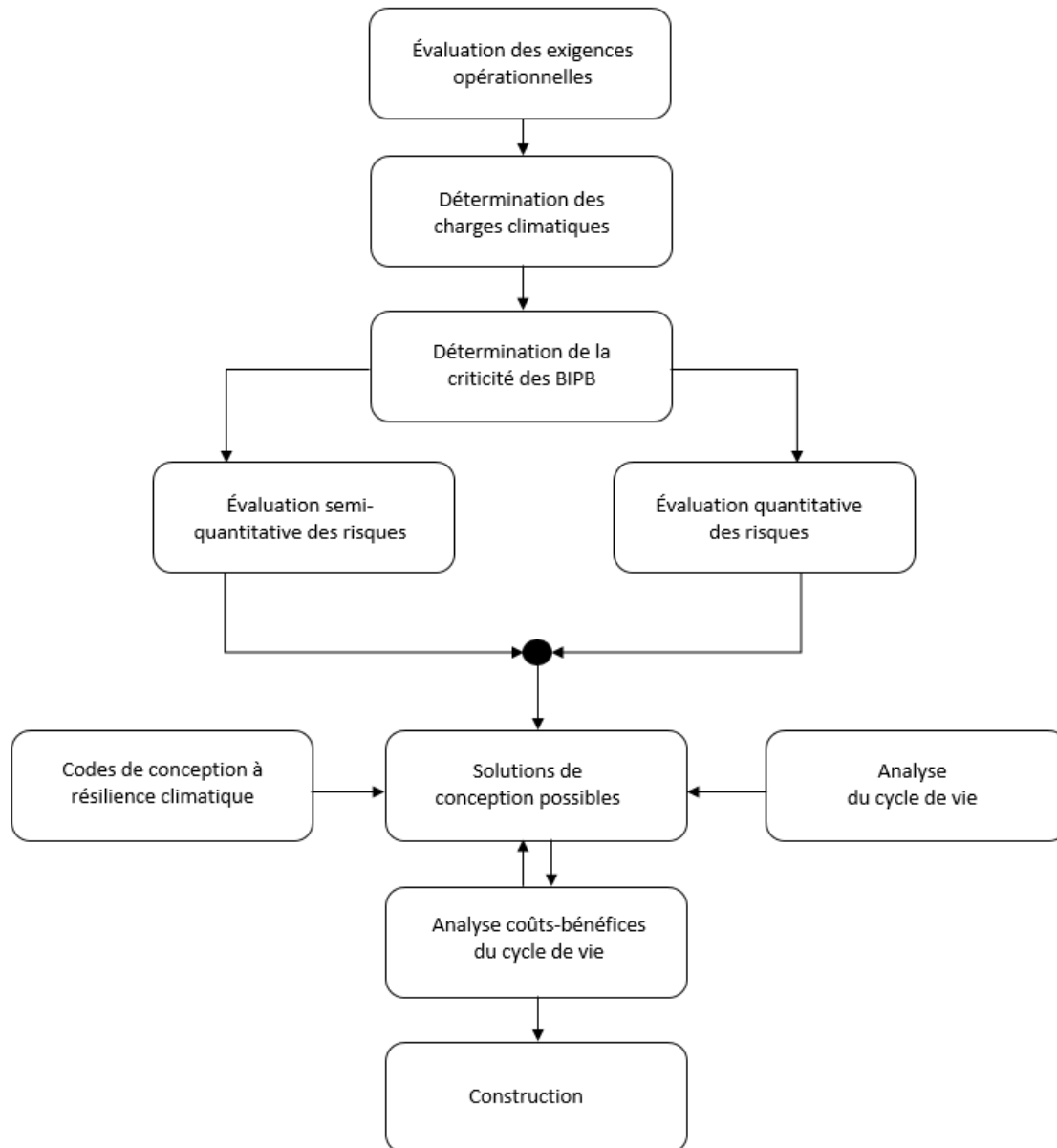


Figure 16 – Meilleures pratiques en matière de conception des bâtiments et infrastructures publiques de base résilients aux changements climatiques

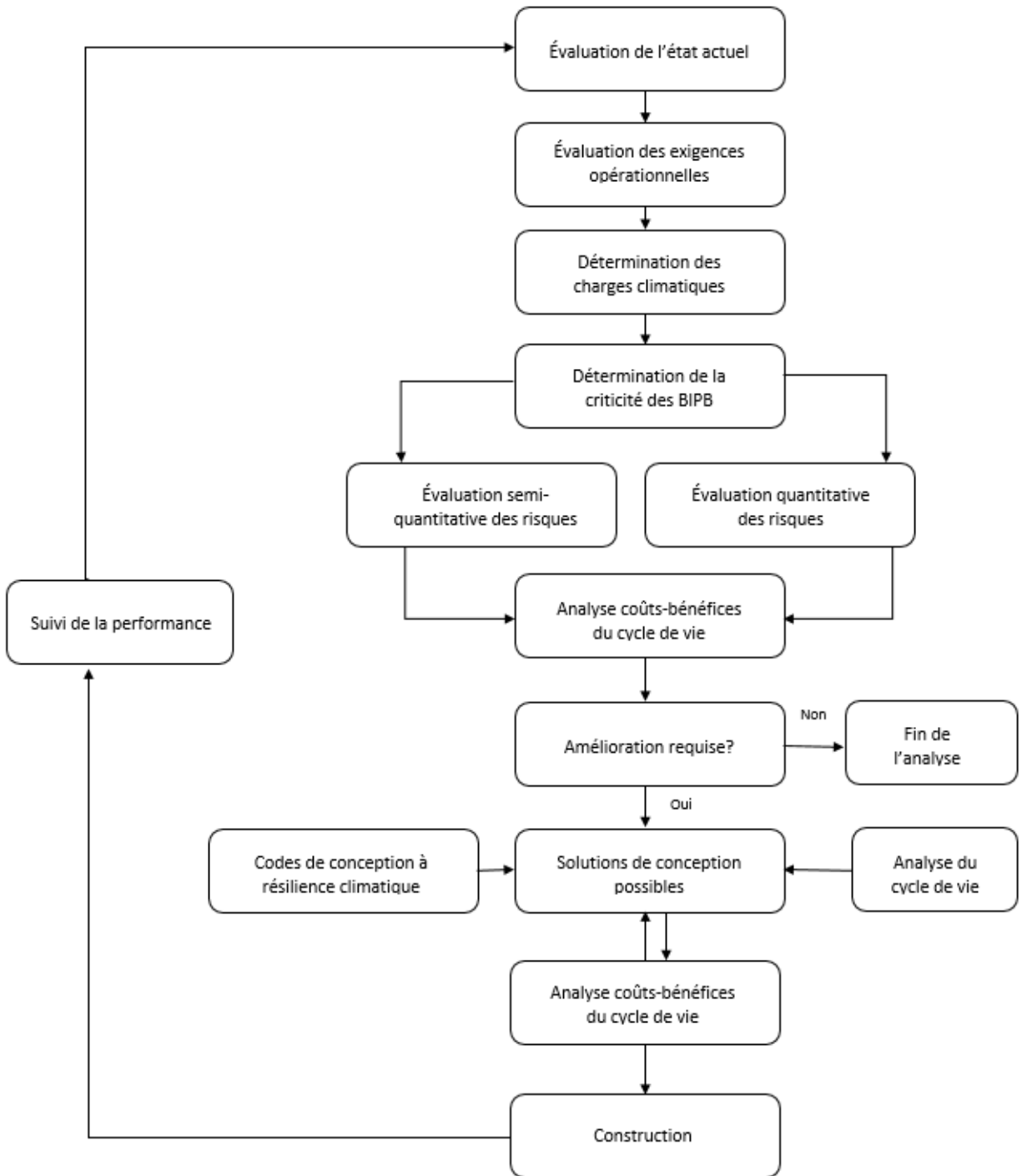


Figure 17 – Gestion des actifs existants pour assurer la conception de bâtiments et infrastructures publiques de base résilients aux changements climatiques

14. Synthèse des répercussions des changements climatiques et des besoins en recherche

14.1 Résumé des effets climatiques sur différents systèmes d'infrastructure

L'examen de l'analyse menée sur des sujets précis (sections 4 à 8) révèle l'existence d'un certain nombre de préoccupations communes concernant les répercussions des changements climatiques sur les BIPB. Il est également clair que les impacts potentiels des changements climatiques peuvent varier considérablement, allant d'aléas climatiques pouvant causer une défaillance structurale soudaine en raison d'efforts excessifs à des aléas qui empêchent le bon fonctionnement de la structure et causent une réduction des niveaux de service.

Le tableau 7 résume les aléas climatiques cernés et les classe en fonction de leur impact potentiel.

Les évaluations qualitatives du tableau 7 sont fondées sur la façon dont les différents aléas climatiques touchent un bâtiment ou un système d'infrastructure donné. Dans le cas des bâtiments, par exemple, les charges dues à la neige et au vent peuvent causer de graves dommages ou un effondrement de la structure. Même si les bâtiments touchés ne s'effondrent pas, ils peuvent demeurer inoccupés pour des périodes prolongées pendant l'évaluation de l'état du bâtiment et les travaux de réparation nécessaires. Des niveaux d'humidité accrus pourraient, pour leur part, accélérer la vitesse de détérioration de certains composants du bâtiment, comme le revêtement intermédiaire de panneaux de copeaux orientés (OSB), et nécessiter leur remplacement précoce.

D'autres répercussions des changements climatiques pourraient avoir une incidence sur la capacité des BIPB d'être exploités de la manière prévue, ce qui pourrait entraîner une interruption ou une perte de service. Par exemple, des températures plus élevées dans les réseaux d'alimentation en eau potable peuvent ne pas avoir d'incidence directe sur l'infrastructure, mais causer des proliférations d'algues ou d'autres problèmes biologiques que le réseau pourrait ne pas être en mesure de gérer.

Un résumé des répercussions possibles selon le type d'aléas climatiques (tableau 8) révèle que, même si tous les types d'aléas peuvent avoir des effets climatiques graves sur certains types de BIPB, l'étendue des répercussions varie considérablement. Les risques d'inondation sont ceux dont l'impact est le plus constant, certains types d'infrastructures souterraines seulement n'étant pas à risque de défaillance soudaine. Les changements dans les précipitations et la température peuvent avoir de graves répercussions sur quelques types de BIPB, ainsi que des impacts opérationnels ou des effets destructeurs accrus sur d'autres. Les vents et les feux de forêt ne touchent que quelques types de BIPB, mais peuvent avoir des répercussions très graves sur les personnes qui sont touchées.

Compte tenu des résultats de l'analyse, il est clair, même si des lignes directrices sont requises sur la façon d'améliorer la résilience climatique de tous les aspects des BIPB, que les risques associés à certains aspects sont beaucoup plus élevés que d'autres. Les structures associées aux bâtiments, aux ponts et aux réseaux de transport en commun sur rail sont grandement vulnérables à la plupart ou à la totalité des aléas climatiques; les routes, les réseaux d'évacuation des eaux pluviales et les réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées de l'Arctique ne sont vulnérables qu'à certains aléas climatiques; et les réseaux d'alimentation en eau potable et d'égouts sanitaires sont vulnérables à un nombre encore moins grand de risques. Ces différences seront prises en compte dans l'établissement des priorités touchant les aspects qui nécessitent des interventions.

Tableau 7 – Effets des aléas climatiques sur les bâtiments et les infrastructures

Type de bâtiment ou d'infrastructure	Possibilité de dommages structuraux	Possibilité de problèmes fonctionnels
Bâtiments	<ul style="list-style-type: none"> • Inondations côtières • Inondations riveraines • Neige • Vents • Incendie • Dégel du pergélisol • Sécheresse (fondations) • Augmentation des précipitations (fondations) 	<ul style="list-style-type: none"> • Crues soudaines • Augmentation des précipitations • Humidité plus élevée • Chaleur extrême
Ponts	<ul style="list-style-type: none"> • Inondations riveraines • Inondations côtières • Vents • Accumulation de glace • Incendie • Dégel du pergélisol • Augmentation des précipitations • Charge due à la glace 	<ul style="list-style-type: none"> • Chaleur extrême • Humidité plus élevée
Routes	<ul style="list-style-type: none"> • Inondation fluviale • Inondations pluviales (tunnels) • Augmentation des précipitations (pentes et remblais) • Inondations côtières 	<ul style="list-style-type: none"> • Dégel du pergélisol • Chaleur extrême • Cycles de gel-dégel • Sécheresse • Incendie
Réseau d'évacuation des eaux pluviales	<ul style="list-style-type: none"> • Inondations riveraines • Crues soudaines 	<ul style="list-style-type: none"> • Augmentation des températures élevées • Sécheresse • Inondations côtières
Réseaux d'évacuation des eaux usées	<ul style="list-style-type: none"> • Charge due à la terre sur les tuyaux enfouis 	<ul style="list-style-type: none"> • Changement dans la plage de températures • Sécheresse • Inondations côtières • Augmentation des précipitations
Réseaux d'alimentation en eau potable	<ul style="list-style-type: none"> • Charge due à la terre sur les tuyaux enfouis 	<ul style="list-style-type: none"> • Changement dans la plage des températures • Sécheresse • Inondations côtières

Type de bâtiment ou d'infrastructure	Possibilité de dommages structuraux	Possibilité de problèmes fonctionnels
Réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées de l'Arctique	<ul style="list-style-type: none"> Dégel du pergélisol 	<ul style="list-style-type: none"> Sécheresse Augmentation des températures élevées Changements dans la plage des températures
Réseaux de transport en commun sur rail	<ul style="list-style-type: none"> Inondations riveraines Cycles de gel-dégel Crues soudaines Vagues de chaleur Pluie verglaçante et verglas Augmentation des précipitations (pentes et remblais) 	<ul style="list-style-type: none"> Orages

Tableau 8 – Évaluation initiale de l'impact des aléas climatiques communs

Type de bâtiment ou d'infrastructure	Inondations	Changements dans les précipitations	Changements de température	Vent	Feux de forêt
Bâtiments	X	X	X	X	X
Ponts	X	X	X	X	X
Routes	X	X	X		X
Réseaux d'évacuation des eaux pluviales	X	X	X		
Réseaux d'évacuation des eaux usées	X	X	X		
Réseaux d'alimentation en eau potable	X		X		
Réseau d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées de l'Arctique		X	X		
Réseaux de transport en commun sur rail	X	X	X	X	

Définitions :

- Les inondations incluent les crues soudaines, les inondations riveraines et les inondations côtières.
- Les changements de température incluent le dégel du pergélisol, les changements dans les plages des températures, les cycles de gel-dégel, les vagues de chaleur et la pluie verglaçante.
- Le vent inclut les vents extrêmes.
- Les changements dans les précipitations incluent les précipitations accrues, la sécheresse, les orages, les changements de l'humidité relative, les accumulations de glace et les charges dues à la neige.

14.2 Besoins en recherche

L'analyse à la section 14.1 tient compte des impacts potentiels des aléas climatiques et suggère comment établir l'ordre de priorité des travaux de l'initiative. Cette analyse ne correspond toutefois pas précisément aux besoins réels en recherche, car il faudra déployer des degrés d'effort différents pour répondre aux besoins énumérés. L'effort de recherche estimé pour chacun des différents aspects du travail est indiqué au tableau 9. De plus, une colonne a été ajoutée au tableau 9 pour des questions de planification communautaire plus générales qui ne relèvent pas des BIPB, mais qui concordent avec les aléas climatiques et les thèmes généraux abordés. Les exemples spécifiques incluent les suivants :

- les pourcentages croissants de surfaces imperméables dans les villes qui entraînent un écoulement des précipitations sur les surfaces plutôt que dans le sol;
- la conception de collectivités présentant une résilience aux feux de forêt (p. ex., en limitant les emplacements d'arbres et en créant des coupe-feu entre les quartiers).

D'autres domaines pour lesquels la recherche est nécessaire à l'appui de la planification communautaire peuvent être cernés au cours de l'initiative. Les principaux thèmes de recherche et les domaines de recherche connexes sont également montrés au tableau 9.

Certains domaines de recherche mentionnés au tableau 9 sont couverts par des activités de recherche déjà en cours ou par des activités planifiées distinctes. Les lignes directrices sur les besoins d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées dans l'Arctique relèvent du Programme de recherche sur l'Arctique du CNRC. Le CNRC est également actuellement en discussion avec les parties intéressées autochtones et des Premières Nations au sujet de l'élaboration de lignes directrices sur la résilience climatique des bâtiments et des infrastructures dans les régions éloignées, y compris les collectivités autochtones nordiques et isolées. Ces domaines hors de la portée de la présente initiative sont montrés dans les cases mauves du tableau.

Les domaines de recherche principaux sont indiqués dans les cases vertes du tableau 9. Ces domaines ont été choisis en fonction des besoins et tiennent compte de la vulnérabilité de certains types de BIPB aux changements climatiques et aux phénomènes météorologiques extrêmes, ainsi que des types d'aléas climatiques les plus susceptibles d'accroître le risque de défaillance.

Les domaines de recherche d'intérêt secondaire, où seuls des problèmes climatiques spécifiques seront abordés, sont indiqués dans les cases orange du tableau. Il convient de souligner que même si les parties intéressées du réseau de transport en commun sur rail ont exprimé une forte préférence pour des solutions intégrées de résilience climatique qui couvriraient tous les aspects de l'infrastructure et des opérations du réseau de transport en commun sur rail, la portée et l'enveloppe de financement de l'initiative BIPBRCC ne répondront qu'à un sous-ensemble des besoins de l'infrastructure du réseau de transport collectif sur rail.

Tableau 9 – Exigences en matière de recherches de l'initiative BIPBRCC

	Bâtiments *	Ponts*	Routes**	Eau potable/ Eaux usées**	Eau potable et eaux usées de l'Arctique***	Réseau de transport en commun sur rail **	Planification communautaire
Thèmes généraux							
Données et charges climatiques*	3	3	2	3	3	3	3
Outils de soutien aux décisions *	3	3	2	2	3	3	2
Collectivités autochtones ****	3	1	2	3	3	0†	2
Aléas climatiques							
Inondations*	3	3	2	3	1	3	3
Changements dans les précipitations	3	2	1	1	2	2	2
Changements de température	2	3	2	2	3	3	3
Vents extrêmes	3	3	1	0	1	3	2
Feux de forêt*	2	1	1	1	0	0	3
Recherche d'appoint							
Géotechnique	2	2	3	2	1	3	1
Durabilité des matériaux et des systèmes	2	2	2	1	2	2	1
Gestion des risques	3	3	2	2	3	3	3
Courbes IDF	2	3	3	3	1	3	3

Les cotes numériques représentent la quantité de recherche nécessaire dans un domaine pour répondre aux exigences de l'initiative BIPBRCC, plutôt que les priorités de recherche (1 = faible niveau de recherche nécessaire, 3 = niveau élevé de recherche nécessaire).

* Domaines de recherche principaux

** Domaines de recherche secondaires

*** Domaines hors de la portée de l'initiative

† Certaines Premières Nations possèdent et exploitent des services de transport collectif sur rail pour passagers et pour fret. Si ces services sont inclus dans le réseau de transport collectif sur rail, l'effort de recherche devrait être classé comme un niveau « 3 ».

15. Sommaire et recommandations

Les facteurs climatiques comme la température, les précipitations et le vent jouent un rôle clé dans la conception, l'exploitation, le vieillissement et la gestion des BIPB. La conception et la gestion des BIPB reposent toutefois sur des données climatiques historiques qui ne tiennent pas compte des impacts des changements climatiques.

L'absence d'un soutien approprié en matière d'information et de prise de décisions pour la conception et la gestion des systèmes de BIPB dans un climat qui change met les Canadiens et les collectivités canadiennes à risque. Les événements météorologiques extrêmes majeurs, comme les inondations, les tempêtes de verglas, les feux de forêt et les vents violents, peuvent causer des dommages coûtant des milliards de dollars et des pertes de vie. Le besoin accéléré de réhabilitation et de remplacement des BIPB en raison du vieillissement et de la détérioration accrue dus aux changements climatiques accroîtra également le déficit en infrastructures existant au Canada et exercera des pressions financières supplémentaires sur les propriétaires des BIPB. L'analyse présentée ici confirme qu'il faut déployer des efforts considérables pour fournir les codes, les lignes directrices et les outils de soutien à la prise de décisions nécessaires pour protéger les Canadiens des dangers liés aux changements climatiques, et pour aider les propriétaires de BIPB à optimiser la gestion de leurs systèmes afin de réduire au minimum le risque de défaillance et les coûts du cycle de vie.

Il n'est toutefois pas nécessaire de déployer des efforts égaux dans tous les domaines. Comme le montrent les tableaux 7 à 9, il existe des besoins importants en matière d'adaptation climatique des bâtiments, des ponts et des réseaux d'évacuation des eaux pluviales. La recherche et le développement ciblés porteront sur des aspects clés de la résilience climatique des routes, des réseaux d'alimentation en eau potable et d'évacuation des eaux usées, et du réseau de transport collectif sur rail. Ces autres types de BIPB sont également vulnérables aux risques climatiques, mais les vulnérabilités sont plus spécifiques et, dans certains cas, sont principalement attribuables à l'évolution des conditions de base plutôt qu'à des événements extrêmes. De même, les inondations ont une incidence directe sur la plupart des catégories de BIPB, tandis que les feux de forêt représentent un danger pouvant causer d'immenses dommages en peu de temps.

Il est donc recommandé que l'initiative BIPBRCC inclue :

- des efforts majeurs de recherche et de développement dans les domaines de la résilience climatique des bâtiments et des ponts, et de la gestion des eaux pluviales;
- de la recherche et du développement axés sur d'autres types d'infrastructures;
- d'autres activités ciblées de recherche et de développement portant sur des événements météorologiques extrêmes, comme les inondations et les feux de forêt.

Les travaux sur les inondations devront être menés de concert avec les initiatives fédérales existantes. Les questions liées à l'Arctique et aux collectivités autochtones débordent de la portée de l'initiative BIPBRCC, tout comme les travaux sur les cadres décisionnels et l'ACBCV.

Remerciements

Les auteurs du présent rapport tiennent à souligner le soutien financier d'Infrastructure Canada. De nombreuses personnes et organisations ont contribué à la réussite des travaux de cette année sur l'initiative BIPBRCC par l'entremise de cofinancement, de contributions en nature et de rapports de recherche. Les auteurs du présent rapport remercient les personnes et entreprises suivantes pour leur contribution à l'initiative : AECOM Limited, l'Association canadienne des entrepreneurs en couverture, l'Association canadienne du transport urbain (ACTU), l'Association des transports du Canada (ATC), Baird, Barry J. Adams (Université de Toronto), le Bureau d'assurance du Canada (BAC), le Conseil canadien des normes (CCN), Cryofront, Dialog, Environnement et Changement climatique Canada (ECCC), Fabian Papa (HydraTek Inc.), FireSmart Canada, GEMTEC, le Groupe CSA, HCEL, Houle & Chevrier Engineering Ltd., HydraTek Inc., ICF Canada, l'Institut de prévention des sinistres catastrophiques (IPSC), Ken Johnson (Cryofront), la National Fire Protection Association (NFPA), le National Institute of Standards and Technology (NIST) des É.-U., Normes ULC, le Pacific Climate Impacts Consortium (PCIC), Peter Kalinger, la province d'Alberta, la province de la Nouvelle-Écosse, la province d'Ontario, la province de Québec, la province de Terre-Neuve-et-Labrador, Ressources naturelles Canada (RNCan), Risk Sciences International (RSI), RWDI Consulting Engineers and Scientists, Sécurité publique Canada (SPC), Slobodan Simonovic Consulting Engineer Ltd., Stantec, TLSmith Consulting Inc., la Toronto Transit Commission (TTC), l'Université du Colorado, l'Université de la Floride, l'Université de New York, l'Université d'Ottawa, l'Université Ryerson, l'Université de Victoria, l'Université de Waterloo, l'Université Western, la Ville de Calgary, la Ville d'Edmonton, la Ville de Toronto, la Ville de Winnipeg et Wayne B. Trusty & Associates Limited.

Références bibliographiques

AASHTO (2015). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*, American Association of State Highway and Transportation Officials.

Alberta Sustainable Resource Development (2010). *Climate Change Adaptation Framework Alberta Sustainable Resource Development*, Edmonton (Alberta), 38 p.

Al-Qadi, I. L. et Murell, S. (Los Angeles, Californie). American Society for Civil Engineering, pp. 22- 29.

American Society of Civil Engineers (2014). *Flood Resistant Design and Construction*, Reston (Virginia), American Society of Civil Engineers, 80 p.

APEGBC (2016). *Developing Climate Change-Resilient Designs for Highway Infrastructure in British Columbia*, v1.0, Association of Professional Engineers and Geoscientists of BC.

Arup T1009 Phase 2 Consortium (2016). *Tomorrow's Railway and Climate Change Adaptation*, Londres (Royaume-Uni).

ASHRAE (2014). *Standard for the Design of High-Performance Green Buildings*, ASHRAE, ANSI/ASHRAE/IES/USGBC Standard 189.1-2014, 132 p.

Association canadienne de normalisation (2014). *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*, Groupe CSA, CAN/CSA-S6-14.

Association des transports du Canada (2013). *Guide de conception et de gestion des actifs des chaussées*, Ottawa (Ontario), 488 p.

Association des transports du Canada (2017). *Guide canadien de conception géométrique des routes de l'ATC*, Ottawa (Ontario).

ASTM International (2015). *Standard Practice for Measuring Life-Cycle Costs of Buildings and Building Systems*, West Conshohocken (Pennsylvania), American Society for Testing and Materials, E917, 23 p.

ASTM International (2016). *Standard Practice for Minimum Criteria for Comparing Whole Building Life Cycle Assessments for Use with Building Codes, Standards, and Rating Systems*, West Conshohocken (Pennsylvanie), ASTM E2921 - 16a, 4 p.

Attar, A. et Lounis, Z. (2017). « *Climate Change and Codes Implementation: Proceedings of International Workshop* », *Climate Change and Codes Implementation*, Ottawa (Ontario), Conseil national de recherches du Canada.

Bruce, J. P., Enger, I.D.M. et Noble, D. (2006). *Adapting to Climate Change: A Risk-Based Guide for Ontario Municipalities*, Toronto (Ontario), Ministère des Affaires municipales et du Logement de l'Ontario.

Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes (2012). *Volume 1 : Routes et systèmes d'eau potable, d'eaux usées et d'eaux pluviales municipaux*.

Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes (2016). *Éclairer l'avenir. Bulletin de rendement des infrastructures canadiennes 2016*.

Bureau de la sécurité des transports du Canada (2019). *Rapport d'enquête ferroviaire R13C0069*, consulté le 11 avril 2019 au <http://www.bst-tsb.gc.ca/fra/rapports-reports/rail/2013/R13C0069/R13C0069.html>.

California Building Standards Commission (2016). « *California Code of Regulations* », *California Green Building Standards Code*, Washington (D.C.), International Code Council, Title 24, Part 11.

Chambre de commerce du Canada (2013). *Les bases d'un Canada compétitif : la nécessité d'investir de façon stratégique dans les infrastructures*.

Chan, S., Bennett, B. et Kazmierowski, T. (2013). *Implementation of Ontario's Pavement Sustainability Rating System – GreenPave*, Airfield and Highway Pavement Conference.

Cheng, L. et AghaKouchak, A. (2014). « *Nonstationary Precipitation Intensity-Duration-Frequency Curves for Infrastructure Design in a Changing Climate* », *Scientific Reports*, 4, p. 7093.

Collette, R. (2012). « *Life Cycle Assessment for Concrete and Asphalt Pavement at the Network Scale* », *10th International Conference on Concrete Pavements*, Québec (Québec), Canada, Transportation Research Board, pp. 501-516.

Collins, M. et coll. (2013). « *Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility* », *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge (Royaume-Uni) et New York (New York), Cambridge University Press, pp. 1029-1136.

Commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies (2015). *Code national du bâtiment – Canada*, Ottawa (Ontario), Conseil national de recherches du Canada.

Conseil du bâtiment durable du Canada (2017). « *LEED® : la marque internationale de l'excellence* », consulté le 6 juin 2017 au https://www.cagbc.org/CBDCA/LEED/Pourquoi_LEED/CBDCaSiteWeb/Programmes/LEED/_LEED.aspx?hk_ey=b9070ef0-10da-47a5-a06f-7c4fa31f46f9.

Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (2009). *Potential Costs and Benefits of Adaptation Options: A Review of Existing Literature*, New York (New York), Nations Unies, 80 p.

Dickens, M. (2016). *Transit Ridership Report Third Quarter 2016*, American Public Transportation Association, Washington (D.C.).

Dong, Y. et Frangopol, D.M. (2016). « *Probabilistic Time-Dependent Multihazard Life-Cycle Assessment and Resilience of Bridges Considering Climate Change* », *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(5).

ecoinvent (2017). « *ecoinvent v. 3.* », consulté le 8 juin 2017 au <http://www.ecoinvent.org/>.

Environnement et Changement climatique Canada (2017). *Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Émissions de gaz à effet de serre*, Ottawa (Ontario).

Environnement et Changement climatique Canada (5 avril 2017). *Ensembles de données climatiques en génie*, consulté le 3 mai 2017 au http://climate.weather.gc.ca/prods_servs/engineering_f.html.

Federal Highway Administration (2015). *Climate Change Adaptation Guide for Transportation Systems Management, Operations, and Maintenance*, United States Department of Transport, Washington (D.C.), 78 p.

Federal Highway Administration (2016). *2013-2015 Climate Resilience Pilot Program: Outcomes, Lessons Learned, and Recommendations*, United States Department of Transport, Washington (D.C.), 58 p.

FireSmart Canada (2017). « *Firesmart Canada* », consulté le 3 mai 2017 au <https://www.firesmartcanada.ca/>.

Firewise (2017). Consulté le 3 mai 2017 au <http://www.firewise.org/>.

Government of the United Kingdom (2012). *Climate Change Risk Assessment - Evidence Report*, Norwich (Royaume-Uni), The Stationary Office.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (2014). « *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects* », *Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge (Royaume-Uni) et New York (New York), Cambridge University Press.

Groupe de la Banque mondiale (2010). *The Economics of Adaptation to Climate Change*, Washington (D.C.), La Banque mondiale, 84 p.

Groupe de travail sur l'adaptation et la résilience climatique (2016). *Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques*, Ottawa (Ontario), Gouvernement du Canada, 53 p.

Groupe de travail sur l'économie de l'adaptation au climat (2009). *Shaping Climate Resilient Development: A Framework for Decision-Making*, San Francisco (Californie), 164 p.

Groupe de travail sur la gestion des feux de forêt (2016). *Stratégie canadienne en matière de feux de forêt : Évaluation décennale et renouvellement de l'appel à l'action*, Ottawa (Ontario), Conseil canadien des ministres des forêts, 15 p.

Häkkinen, T. et Mäkelä, K. (1996). « Environmental Adaption of Concrete: Environmental Impact of Concrete and Asphalt Pavements », *VTT Tiedotteita-Meddelanden-Research Notes 1752:93*, Espoo (Finlande), Technical Research Center of Finland.

Horvath, A. et Hendrickson, C. (1998). « *Comparison of Environmental Implications of Asphalt and Steel-Reinforced Concrete Pavements* », *Transportation Research Record 1626*, pp. 105- 113.

Ingénieurs Canada (2011). *PIEVC Engineering Protocol for Infrastructure Vulnerability Assessment and Adaptation to a Changing Climate*, Conseil canadien des ingénieurs.

Institut de prévention des sinistres catastrophiques (2010). *Home Builder's Guide*, Toronto (Ontario).

Insurance Institute for Business and Home Safety (2008). *Fortified for Safer Living: Builder's Guide*, Tampa (Floride), 81 p.

International Code Council (2011). *International Wildland-Urban Interface Code*, Washington (D.C.).

International Code Council (2015). *International Green Construction Code*, Washington (D.C.).

Jacob, K., Maxemchuck, N. et coll. (2011). Télécommunications. *Responding to Climate Change in New York State: The ClimAID Integrated Assessment for Effective Climate Change Adaptation in New York State*, New York (New York), Annals of the New York Academy of Sciences, 1244, pp. 363-396.

Johnson, K. R. (2017). *Climate Change Impacts on Water and Wastewater Systems in the Arctic*, Edmonton (Alberta), Cryofront.

Kendall, A., Keoleian, G. et Helfand, G. (2008). « *Integrated Life-Cycle Assessment and Life-Cycle Cost Analysis Model for Concrete Bridge Deck Applications* », *Journal of Infrastructure Systems*, 14(3), pp. 214-222.

Kirshen, P., Ruth, M. et Anderson, W. (2008). « *Interdependencies of Urban Climate Change Impacts and Adaptation Strategies: A Case Study of Metropolitan Boston USA* », *Climate Change*, 86(1-2), pp. 105-122.

Kuo, C., Gan, T.Y. et Gizaw, M. (2015). « *Potential Impact of Climate Change on Intensity Duration Frequency Curves of Central Alberta* », *Climate Change*, 130(2), pp. 115-129.

Larsen, L. et coll. (2011). *Green Building and Climate Resilience: Understanding Impacts and Preparing for Changing Conditions*.

Larsen, P. H. et coll. (2008). « *Estimating Future Costs for Alaska Public Infrastructure at Risk from Climate Change* », *Global Environmental Change*, 8(3), pp. 442-457.

Lounis, Z. et McAllister, T. (2016). « *Risk-Based Decision Making for Sustainable and Resilient Infrastructure Systems* », *ASCE Journal of Structural Engineering*, 142, pp. 90-109.

Major, D. C., Omojola, A. et Dettinger, M. (2011). « *Climate Change, Water, and Wastewater in Cities* », *Climate Change and Cities: First Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network*, Cambridge (R.-U.), Cambridge University Press, pp. 114-143.

Marletto, V. et coll. 2012. *Climate Change Planning for Regional and Local Authorities*, Bologne (Italie), Centre régional d'impression d'Emilie-Romagne.

Marteaux, O. (2016). *Tomorrow's Railway and Climate Change Adaptation: Executive Report*, Rail Safety and Standards Board Limited.

Mekis, E. et Vincent, L.A. (2011). « *An Overview of the Second Generation Adjusted Daily Precipitation Dataset for Trend Analysis in Canada* », *Atmosphere-Ocean*, 2, pp. 163-177.

Meyers, M. et coll. (2014). *Strategic Issues Facing Transportation Volume 2: Climate Change, Extreme Weather Events, and the Highway System: Practitioner's Guide and Research Report*, Transportation Research Board.

National Fire Protection Association (2017). « *Wildland Fire Protection Standards* », tiré de <http://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards?search=wildland>.

National Renewable Energy Laboratory (18 novembre 2013). « *U.S. Life Cycle Inventory Database* », consulté le 8 juin 2017 au <http://www.nrel.gov/lci/>.

Nishijima, K., Straub, D. et Faber, M.H. (2007). « *Inter-generational Distribution of the Life-Cycle Cost of an Engineering Facility* », *Journal of Reliability of Structures and Materials*, 1(3), pp. 33- 46.

Office de l'efficacité énergétique – RNCAN (2013). *Enquête sur l'utilisation commerciale et institutionnelle de l'énergie : Bâtiments 2009 – Rapport statistique*, Ottawa (Ontario), Ressources naturelles Canada.

Olsson, J. et coll. (2013). « *Adaptation to Climate Change Impacts on Urban Storm Water: A Case Study in Arvika, Sweden* », *Climatic Change*, 116(2), Springer (Hollande), pp. 231- 247.

Organisation internationale de normalisation (ISO) (2006a). *Management environnemental – Évaluation du cycle de vie – Principes et cadre*, Genève (Suisse), ISO 14040.

Organisation internationale de normalisation (ISO) (2006b). *Management environnemental – Évaluation du cycle de vie – Exigences et lignes directrices*, Genève (Suisse), ISO 14044.

Organisation internationale de normalisation (ISO) (2009). *Management du risque – Lignes directrices*, Genève (Suisse), ISO 31000.

Ouranos (2019). Consulté le 3 avril 2019 au <https://www.ouranos.ca/>.

Padgett, J. et Tapia, C. (2013). « *Sustainability of Natural Hazard Risk Mitigation: Life Cycle Analysis of Environmental Indicators for Bridge Infrastructure* », *Journal of Infrastructure Systems*, 19, pp. 395-408.

Peck, A., Prodanovic, P. et Simonovic, S.P. (2012). « *Rainfall Intensity Duration Frequency Curves Under Climate Change: City of London, Ontario, Canada* », *Revue canadienne des ressources hydriques*, 37 (3), pp. 177-189.

Province de la Colombie-Britannique (2016). *British Columbia's Climate Leadership Plan*, Province of British Columbia, 52 p.

Sandick, D. et coll. (2017). *State of the Art/Practice and Knowledge Gap Identification: Wildland Urban Interface Fires*, Toronto (Ontario).

Sécurité publique Canada (7 mars 2017). *Cadre fédéral de la cartographie des plaines inondables*, consulté le 3 mai 2017 au <https://www.securitepublique.gc.ca/cnt/mrgnc-mngmnt/dsstr-prvntn-mtqtn/ndmp/fldpln-mppng-fr.aspx>.

Shepherd, M. et Zhang, X. (2017). « *Canada's Changing Climate and Resilient Infrastructure* », *Climate Change and Codes Implementation*, Ottawa (Ontario), Conseil national de recherches du Canada, pp. 129-143.

Standards Australia (2013). *Climate Change Adaptation for Settlements and Infrastructure - A Risk Based Approach*.

Statistique Canada (2011). *Enquête nationale auprès des ménages*.

Table ronde nationale sur l'économie et l'environnement (2011). *La prospérité climatique. Le prix à payer : Répercussions économiques du changement climatique pour le Canada*, Ottawa (Ontario), 168 p.

Toronto Transit Commission (2016). *Key Facts and Figures*, consulté le 13 mars 2017 au https://www.ttc.ca/Customer_Service/Corporate_Plan/Appendices/Key_facts_and_figures/index.jsp.

Transport for London (2015). *Providing Transport Services Resilient to Extreme Weather and Climate Change*.

Transports Canada (2015). *Les transports au Canada 2014*, Gouvernement du Canada.

Transportation Association of Canada (2013). *Pavement Asset Design and Management Guide*. Ottawa, Ontario: 488.

United Kingdom Highways Agency (2009). *Climate Change Adaptation Strategy and Framework*, D. f. Transport, Londres (Angleterre), 46 p.

United States Department of Housing and Urban Development (2014). *Housing and Urban Development Climate Change Adaptation Plan*, Washington (D.C.).

Vickery, P. (2017). « On the Use of Historical Data to Look for Trends in the Canadian Wind Hazard », *Climate Change and Codes Implementation*, Ottawa (Ontario), Conseil national de recherches du Canada, pp. 53-65.

Wall, T. A. et Meyer, M.D. (2013). « *Risk-Based Adaptation Frameworks for Climate Change Planning in the Transportation Sector: A Synthesis of Practice* », Washington (D.C.), Transportation Research Board.

Wang, X. L. L., Swail, V.R. et Zwiers, F.W. (2006). « *Climatology and Changes of Extratropical Cyclone Activity: Comparison of ERA-40 with NCEP–NCAR Reanalysis for 1958–2001* », *Journal of Climate*, 19, pp. 3145-3166.

Warren, F. J. et Lemmen, D.S. éd. (2014). *Vivre avec les changements climatiques au Canada : perspectives des secteurs relatives aux impacts et à l'adaptation*, Ottawa (Ontario), Gouvernement du Canada, 286 p.

Zwiers, F.W. (2017). « *Challenges in Understanding and Projecting Precipitation Extremes* », *Climate Change and Codes Implementation*, Ottawa (Ontario), Conseil national de recherches du Canada, pp. 113-127.

© (2019) Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le Conseil national de recherches du Canada.
Papier : N° de cat. NR16-236/2018F · ISBN 978-0-660-27265-8 · PDF : N° de cat. NR16-236/2018F-PDF · ISBN 978-0-660-27264-1