



**OBSERVATOIRE
DE LA GESTION INTÉGRÉE
DE L'ESPACE PUBLIC URBAIN**



MANDAT DE RECHERCHE

L'adaptation aux changements climatiques du déneigement et du déglacage dans les villes du sud du Québec

RAPPORT 1

Revue de littérature des mesures d'adaptation



MARS 2024

AUTEURS DU RAPPORT

Auteur : Frédéric Richard

Co-auteur : Philippe Lucas-Picher

Ce rapport est le premier livrable réalisé dans le cadre du mandat de recherche sur l'adaptation aux changements climatiques du déneigement et du déglacage dans les villes du sud du Québec. Les travaux de recherche et la rédaction ont été effectués par Frédéric Richard, étudiant à la maîtrise à l'Université du Québec à Montréal (UQAM), sous la supervision de Philippe Lucas-Picher, professeur à l'UQAM.

PARTENAIRES DU MANDAT DE RECHERCHE

PARTENAIRES FONDATEURS



PARTENAIRES MUNICIPAUX



Ce mandat de recherche a bénéficié d'une subvention :



MISSION

L'Observatoire de la gestion intégrée de l'espace public urbain a débuté sa mission en 2020 au sein du centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CERIU).

MISSION DE L'OBSERVATOIRE

L'Observatoire sur la gestion intégrée de l'espace public urbain a pour mission d'exercer une vigie et d'identifier, de prioriser et de réaliser en partenariat des mandats de recherche sur les meilleures pratiques de gestion et d'intervention en matière d'espace public urbain afin qu'il soit adapté aux besoins évolutifs des différents usagers.

MISSION DU CERIU

Fondé en 1994, le Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines CERIU a pour mission de mettre en œuvre toute action de transfert de connaissance et de recherche appliquée pouvant favoriser le développement du savoir-faire, des techniques, des normes et des politiques supportant la gestion durable et économique des infrastructures et la compétitivité des entreprises qui œuvrent dans le secteur.

CONSEIL SCIENTIFIQUE DE L'OBSERVATOIRE

Le Conseil scientifique de l'Observatoire est impliqué dans l'identification des axes de recherche, le suivi des travaux de recherche avec le stagiaire postdoctoral, la révision et l'approbation des livrables finaux. Ses membres sont :

Hélène Bourdeau, directrice adjointe Planification de projets, service de l'ingénierie, Ville de Laval.

Ghislain Breton, chef d'équipe, développement et aménagement du territoire, division du développement durable, Ville de Québec.

Sophie Duchesne, professeure, Centre Eau Terre Environnement, Institut national de recherche scientifique (INRS).

Annie Fortier, ingénieure de projets, ingénierie municipale, service des travaux publics, Cité de Dorval.

Véronique Laurin, conseillère principale, partenariats d'innovation et de recherche, Agence de mobilité durable.

Patrick Lépine, directeur, service du génie, Ville de Blainville.

Alexandre Nadeau, ingénieur coordonnateur infrastructures, service Infrastructures urbaines, Ville de Longueuil.

Yvan Péloquin, chef de division, service des infrastructures du réseau routier, direction des infrastructures, division de la conception des travaux, Ville de Montréal.

Claude Poirier, directeur, direction du génie, Ville de Boucherville.

Érik Rolland, directeur, direction des travaux publics, Ville de Pointe-Claire.

Alexandre Viens, directeur des technologies de l'information, Ville de Saint-Jean-sur-Richelieu.

Réjean Vigneault, directeur, service de la gestion des infrastructures, Ville de Repentigny.

Rafika Lassel, directrice de l'Observatoire de la gestion intégrée de l'espace public urbain du CERIU.

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Ce rapport présente le portrait général des mesures d'adaptation locales dans les secteurs du déneigement et du déglçage réalisées dans les dernières années à travers le globe. Ces mesures d'adaptation sont directement issues d'une revue de littérature ciblant les thématiques des changements climatiques, de la viabilité hivernale, de la maintenance routière hivernale et du réseau routier. Cette revue de littérature utilise une vingtaine de documents scientifiques qui présentent des solutions pour adapter les pratiques de déneigement et de déglçage aux changements climatiques.

Pour structurer la revue de littérature selon l'objectif d'identifier les mesures d'adaptation possibles, le réseau routier québécois est initialement présenté dans ses grandes lignes pour comprendre le partage des tâches entre les municipalités et le ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec (MTMD).

Pour compléter la présentation du profil du réseau routier québécois, des contacts ont été établis avec des représentants de différentes municipalités de la région du sud du Québec pour approfondir les connaissances quant aux enjeux locaux. Neuf villes de la région ont pris part à ces travaux de recherche en échangeant des informations quant à leurs pratiques de déneigement et de déglçage. Ces échanges ont été réalisés par le biais d'un questionnaire en ligne accompagné d'une entrevue de vive voix en vidéoconférence. Ces différentes villes font face à des enjeux différents, bien que similaires, dans la thématique de la viabilité hivernale et du développement durable des opérations de maintenance hivernale routière. Certaines villes présentent déjà des exemples concrets de mesures d'adaptation aux changements climatiques en termes de déneigement et de déglçage par le biais de réformes sensibilisant les pratiques aux enjeux environnementaux. Certaines villes présentent d'importantes réductions dans leur utilisation de sel pour une qualité de services équivalente.

Afin d'identifier les mesures d'adaptation entreprises par d'autres pays dans le domaine du déneigement et du déglçage, les impacts des changements climatiques sur le réseau routier doivent être identifiés. Différentes sources scientifiques sont utilisées pour documenter les potentiels impacts des changements climatiques sur le réseau routier. Les impacts des changements climatiques sont présentés sous deux catégories : les impacts sur les infrastructures routières et les impacts sur les utilisateurs du réseau routier. Ces impacts restent cependant dans une vision générale et n'incluent pas de précisions locales.

Les mesures d'adaptation en matière de déneigement et de déglçage tirées de la revue de littérature sont catégorisées selon la région, mais également les types d'adaptation.

Le domaine du déglacage est principalement abordé lorsqu'il est question de méthodes alternatives à l'épandage du sel sec plus respectueuses des enjeux environnementaux et qui garantissent une grande qualité opérationnelle. Ces mesures alternatives représentent des produits chimiques alternatifs au sel de voirie ou des technologies diverses permettant la fonte de la neige et de la glace. Certaines régions ont par ailleurs déjà remplacé intégralement le sel de voirie par ces alternatives.

D'autres mesures d'adaptation ciblent davantage la surveillance et la prévision des conditions météorologiques menant aux services de maintenance routière hivernale. Cette surveillance accrue combinant l'état des routes et les conditions météorologiques se présente sous le nom de *Road Weather Information System (RWIS)*.

Finalement, pour conserver l'importance des changements climatiques dans les démarches de recherche effectuées, certains documents scientifiques présentent des méthodes ou des produits permettant d'analyser l'impact concret des changements climatiques sur une région à un haut niveau de précision. D'autres produits proposent plutôt des plans d'adaptation théoriques à l'échelle locale. Ces informations permettent d'identifier l'importance des paramètres locaux dans la mise en place de mesures d'adaptation dans le secteur de la maintenance routière hivernale.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ EXÉCUTIF	4
1 INTRODUCTION	8
2 MÉTHODOLOGIE	10
3 INTRODUCTION AU RÉSEAU ROUTIER QUÉBÉCOIS	12
3.1 Survol du réseau routier québécois	12
3.2 Contexte aux rencontres auprès des municipalités	14
3.3 Synthèse des rencontres auprès des municipalités	14
4 IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	16
4.1 Impacts des changements climatiques sur le réseau routier	16
4.2 Distinctions entre variables météorologiques et changements climatiques	16
4.3 Impacts des variables météorologiques sur les infrastructures	16
4.4 Impacts des variables météorologiques sur les usagers du réseau routier	19
4.5 Impacts des changements climatiques sur les infrastructures	20
4.6 Impacts des changements climatiques sur les usagers	23
4.7 Synthèse	26
5 MESURES D'ADAPTATION	27
5.1 Guide des bonnes pratiques : épandage	27
5.2 Guide des bonnes pratiques : le déneigement	32
5.3 Mesures d'adaptation concrètes selon la région	33
5.4 Limite des méthodes d'adaptation	39
6 OUTILS ET NOUVELLES TECHNOLOGIES	40
6.1 Winter Severity Index (WSI)	40
6.2 Infrastructure Planning Support System (IPSS)	41
6.3 Road Weather Information System (RWIS)	42
6.4 Schémas Théoriques	42
ANNEXE	47
ANNEXE 1 : questionnaire fourni aux villes participantes	48
BIBLIOGRAPHIE	49
Bibliographie	50

Liste des figures

Figure 1 - Diagramme ombrothermique de la ville de Montréal pour la période 1991-2001.....	8
Figure 2 - Température eutectique selon la concentration du produit	29
Figure 3 - Distribution des villes selon leur quantité annuelle de neige (cm) et leur température moyenne (°C) du mois le plus froid.....	36
Figure 4 - Schéma d'adaptation proposé	43

Liste des tableaux

Tableau 1 - Liste des municipalités ayant pris part au partage d'informations.....	10
Tableau 2 - Classification des routes selon le MTMD	12
Tableau 3 - Types de services de maintenance routière.....	13
Tableau 4 - Types de route et service minimum requis	14
Tableau 5 - Impacts des variables météorologiques sur les infrastructures routières.....	17
Tableau 6 - Impacts des variables météorologiques sur les usagers	19
Tableau 7 - Effets des changements climatiques sur les infrastructures.....	21
Tableau 8 - Effets des changements climatiques sur les usagers	24
Tableau 9 - Analyse des coûts des différents produits	29
Tableau 10 - Méthodes thermiques de déglacage.....	31
Tableau 11 - Méthodes thermiques analysées financièrement	31
Tableau 12 - Liste des mesures d'adaptation.....	44

1 INTRODUCTION

Selon la classification des climats de Köppen-Geiger, le sud du Québec est partagé entre un climat continental froid et un climat subarctique¹. Dans cette région, les hivers sont généralement longs et rigoureux, alors que les étés sont chauds et humides. Sur la période 1991-2020, la région présente une médiane de 28 jours par année avec une température minimale inférieure à -15 °C². Sur la même période, la médiane pour le nombre de jours par année avec une température maximale supérieure à 25 °C s'élève à 67². Quant aux précipitations, celles-ci restent relativement constantes sur l'année³.

Pour mieux visualiser les variations saisonnières de la précipitation et de la température dans le sud du Québec, la figure 1 présente le diagramme ombrothermique de la ville de Montréal sur la période 1991-2021⁴.

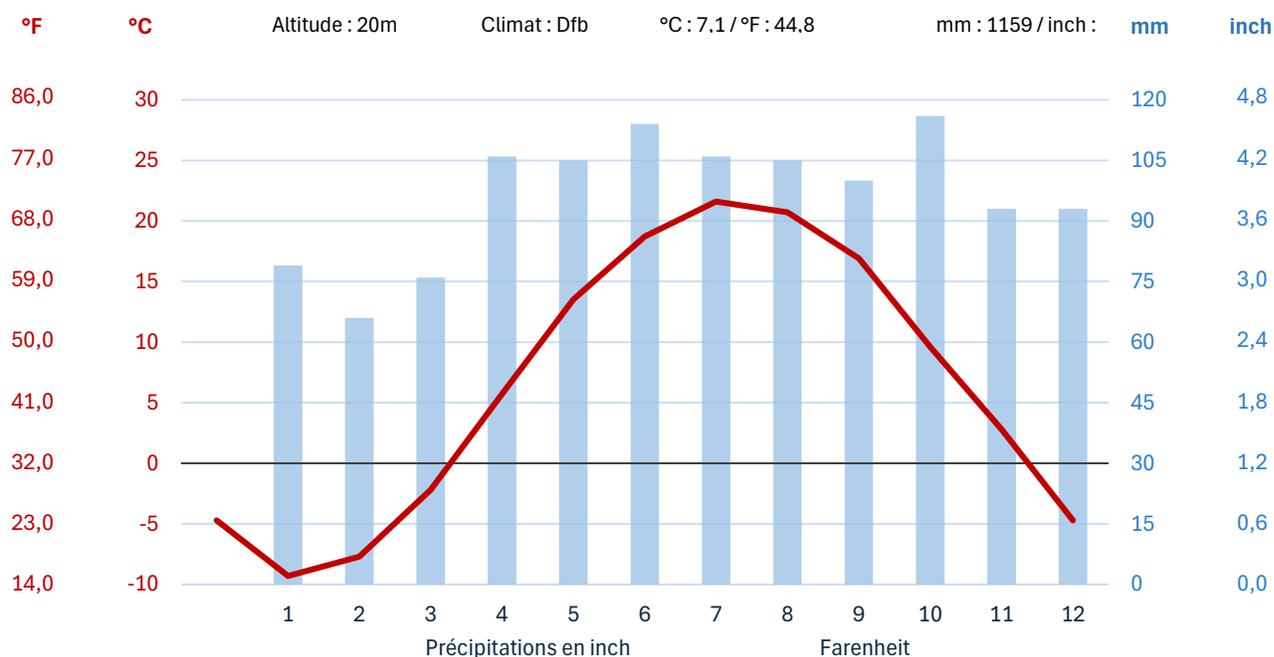


Figure 1 - Diagramme ombrothermique de la ville de Montréal pour la période 1991-2001

¹ Cui et al., 2021.

² Données climatiques Canada, 2023.

³ Snow and Ice Databook, 2022.

⁴ Climate Data, 2022.

Cependant, considérant la hausse anticipée des températures globales, la nature des intempéries hivernales risque d'être modifiée selon l'évolution des conditions météorologiques. Typiquement, depuis 1961, il est déjà question d'une hausse des températures de 1,3 °C pour la région du sud du Québec et d'une augmentation des précipitations annuelles de 130 mm⁵.

Les changements climatiques ont des impacts considérables sur les infrastructures routières, que ce soit sur la conception, la construction ou même la maintenance de celles-ci⁶. Les différentes variables météorologiques ont des impacts directs et indirects sur le réseau de transport affectant à la fois les infrastructures, mais également les utilisateurs du réseau routier⁷. Afin de réduire les impacts négatifs des changements climatiques sur le réseau routier, des mesures d'adaptation doivent être considérées pour être mieux préparé à ces nouveaux défis.

Les autorités routières jouent un rôle particulièrement important dans la réduction des risques liés aux changements climatiques, et bien que le phénomène soit plus local que global, différentes mesures d'adaptation ont déjà été appliquées dans différentes régions⁸.

Dans le cadre de cette revue de littérature, il est question d'identifier et d'étudier différentes mesures d'adaptation possibles face aux changements climatiques, et ce, en ciblant principalement le thème du déneigement et du déglçage. Les mesures d'adaptation portant sur le réseau routier dans son ensemble ont également été analysées.

Cette revue de littérature comporte initialement un survol du réseau de transport routier québécois. Par la suite, les impacts des changements climatiques sur le réseau routier sont décrits. Les derniers chapitres présentent une liste non exhaustive des mesures d'adaptation en matière de maintenance routière hivernale.

⁵ Snow and Ice Databook, 2022.

⁶ Picketts et al., 2015.

⁷ Rychen, 2013.

⁸ Matthews et al., 2021.

2 MÉTHODOLOGIE

Le projet de recherche s'est déroulé sur une période de quatre mois de travail, de septembre à décembre 2022. Durant cette période, un questionnaire a été rédigé et envoyé aux différentes municipalités pour récolter des informations quant aux enjeux locaux. Le partage d'informations s'est alors réalisé par le biais de ce questionnaire en complément de rencontres en visioconférence avec les représentants de différentes municipalités participantes pour récolter les informations pertinentes. Le tableau 1 présente la liste des municipalités ayant répondu au questionnaire.

Tableau 1 - Liste des municipalités ayant pris part au partage d'informations

Municipalités	Partage d'informations
Blainville	✓
Boucherville	✓
Dorval	✓
Laval	✓
Longueuil	✓
Montréal	✓
Québec	✓
Repentigny	✓
Saint-Jean-sur-Richelieu	✓

Le questionnaire présenté aux municipalités est disponible en Annexe 1. Ce questionnaire englobe des thèmes généraux sur le déneigement et le déglçage pouvant permettre de mieux comprendre les opérations de maintenance hivernale routière d'une ville à une autre. Les rencontres en visioconférence ont permis de pousser ces questions à un niveau plus détaillé.

En amont de la collecte d'informations auprès des municipalités, une revue de littérature a été réalisée en ciblant une vingtaine d'articles scientifiques portant sur les thèmes de la viabilité hivernale, de la maintenance routière hivernale, du développement durable, des mesures d'adaptation en matière de déneigement et des impacts des changements climatiques sur le réseau routier.

Finalement, afin de préparer les études climatiques du prochain livrable, une liste des stations météorologiques et des simulations climatiques disponibles qui seront utilisées pour analyser les impacts des changements climatiques au Québec a été élaborée⁹. Ces stations météorologiques sont toutes situées à une distance de 50 km et moins de la ville de Montréal et possèdent des données météorologiques sur une période suffisamment longue pour évaluer les changements climatiques.

⁹ Cette liste sera disponible dans les prochains livrables de ce mandat de recherche.

3 INTRODUCTION AU RÉSEAU ROUTIER QUÉBÉCOIS

3.1 SURVOL DU RÉSEAU ROUTIER QUÉBÉCOIS

Au Québec, le maintien des infrastructures routières est une responsabilité partagée entre le ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec (MTMD) et les municipalités. Si le MTMD est responsable du réseau routier dans sa globalité, les villes doivent cependant s'assurer de l'entretien des routes publiques sur leur territoire.

Sur un total de 140 534 km de routes, le MTMD gère 22,1 % pour 77,9 % pour les municipalités¹⁰. Le MTMD utilise également un système de classification des routes selon leur utilisation. Cette classification est présentée au tableau 2.

Tableau 2 - Classification des routes selon le MTMD¹⁰

Classification	Description
Autoroute	Inclus les infrastructures liées aux autoroutes
Réseau national	Inclus les routes inter régions et les routes connectant les grandes villes (> 25 000 habitants)
Réseau régional	Inclus les routes reliant les villes moyennes aux villes principales (5 000 à 25 000 habitants)
Réseaux collecteur	Inclus les routes reliant les petites villes aux villes moyennes (> 5 000 habitants)
Réseau local	Inclus les routes connectant les petites villes entre elles
Réseau d'accès aux ressources	Inclus les routes menant à des ressources particulières comme les sites d'hydroélectricité, les mines et autres lieux sous juridiction gouvernementale

La maintenance des routes s'effectue en combinant la classification routière tel que présentée au tableau 2 et du *Average Winter Daily Traffic (AWDT)*. Le *AWDT* détermine

¹⁰ Snow and Ice Databook, 2022.

la quantité de véhicules par jour passant par la route. La combinaison de ces deux éléments permet l'identification du service adéquat selon les conditions météorologiques présentes¹¹.

Remarque : Malgré tout, en raison des paramètres locaux, les villes n'utilisent pas exactement les mêmes critères pour guider leurs interventions sur le réseau. Les villes doivent considérer la présence d'hôpitaux, de services d'urgences, d'établissements scolaires et de bien d'autres facteurs pour établir les services de déneigement et de déglacage.

Le tableau 3 décrit les différents services de maintenance routière possible alors que le tableau 4 associe ces services aux différents types de routes.

Tableau 3 - Types de services de maintenance routière¹¹

Type de service	Description
Chaussée déneigée	Une chaussée dont les voies de circulation, y compris les accotements, sont exemptes de neige et de glace sur toute leur largeur.
Chaussée partiellement déneigée	Une chaussée dont les voies de circulation sont exemptes de neige et de glace sur une largeur de 3 mètres en ligne droite et de 5 mètres aux points critiques.
Chaussée avec de la neige compactée	Une chaussée dont les voies de circulation et les accotements sont recouverts d'une couche de neige dure pouvant atteindre 3 cm. Dans des conditions météorologiques favorables (température de l'air > 3°C pendant plus de 48 heures), le niveau d'entretien est ramené à celui d'une chaussée partiellement déneigée.

Il est important de mentionner que le AWDT joue un rôle très important dans les services minimums requis, et ce, peu importe le type de route. Le niveau de service décrit au tableau 4 est donc établi comme étant le minimum requis pour les conditions décrites.

¹¹ Snow and Ice Databook, 2022.

Tableau 4 – Niveau de service selon le type de route¹²

Classification	AWDT	Niveau de service
Autoroute	-	Chaussée déneigée
Route nationale	> 2 500 véhicules par jour	Chaussée déneigée
	< 2 500 véhicules par jour	Chaussée partiellement déneigée
Route régionale	> 2 500 véhicules par jour	Chaussée déneigée
	< 2 500 véhicules par jour	Chaussée partiellement déneigée
Réseau collecteur et route d'accès aux ressources	> 2 500 véhicules par jour	Chaussée déneigée
	> 500 véhicules par jour	Chaussée partiellement déneigée
	< 500 véhicules par jour	Chaussée avec de la neige compactée

3.2 CONTEXTE AUX RENCONTRES AUPRÈS DES MUNICIPALITÉS

L'un des objectifs de ce rapport est de récolter des informations auprès des municipalités de la région du sud du Québec pour mieux comprendre les enjeux locaux associés au déneigement et au déglçage. Comme présenté dans la méthodologie, des représentants de neuf villes ont été interrogés par le biais d'un questionnaire présenté en Annexe 1. Suivant les réponses au questionnaire, une rencontre par visioconférence avec chaque représentant a été réalisée pour développer davantage les thématiques pertinentes au projet de recherche. Cette section présente une synthèse et l'analyse des informations recueillies lors des neuf rencontres par visioconférence.

3.3 SYNTHÈSE DES RENCONTRES AUPRÈS DES MUNICIPALITÉS

Les opérations et services de déneigement des différentes municipalités interrogées possèdent des seuils d'accumulation relativement similaires selon l'importance de la rue en question. Dans l'ensemble, pour les artères principales, les opérations débutent dès le

¹² Snow and Ice Databook, 2022.

début des précipitations alors qu'il faut attendre autour de 3 cm d'accumulation pour les rues moins importantes.

Sur le plan de l'épandage, la grande majorité des municipalités utilise du sel de voirie comme fondant. Ce sel est généralement sec bien que certaines villes mentionnent l'utilisation de système permettant une humidification préventive.

Plusieurs réformes ont également eu lieu à l'interne de ces villes pour mettre en place des politiques de viabilité hivernale et réduire les impacts environnementaux néfastes provenant des opérations de déneigement et de déglacage. Ces politiques visent notamment à diminuer l'utilisation de sel et à optimiser le trajet des véhicules affectés au déneigement réduisant ainsi les émissions de gaz à effet de serre. L'existence même de ces réformes sur les opérations de déneigement confirme que le Québec est déjà en train d'appliquer des mesures d'adaptation pour améliorer la qualité des services proposés. En revanche, le sel de voirie sec continue à être utilisé dans la grande majorité des villes interrogées.

Concernant le suivi de l'état des routes, ces mêmes villes indiquent recourir aux employés sur le terrain pour connaître l'évolution de la chaussée. Quelques villes utilisent les services d'une compagnie privée¹³ pour avoir des informations sur l'état de leurs routes. Ce type de compagnie, selon les services utilisés, peut agir comme un *Road Weather Information System (RWIS)* en combinant des prévisions météorologiques à l'état des routes par la présence d'instruments météorologiques. Toutefois, il est important de préciser que toutes les villes n'ont pas recours à ce type de fonctionnalités ou même aux différents services proposés. À l'inverse, ces villes mettent en place actuellement des projets de télémétrie pour incorporer la position GPS des véhicules de déneigement et préparer des cartes interactives des opérations.

Concernant les enjeux climatiques, les villes reconnaissent la variabilité climatique interannuelle des hivers, mais peu d'entre elles mentionnent des changements climatiques significatifs ayant un impact immédiat sur leurs opérations de déneigement. Certaines villes soulignent une fréquence accrue des épisodes de redoux hivernaux ou encore des cocktails météorologiques, soit des phénomènes associés à des variations importantes de température dans un court laps de temps.

La sécurité publique, la disponibilité de l'équipement et la gestion de la neige sont également des enjeux courants dans le domaine du déneigement et du déglacage.

¹³ Météo Routes

4 IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

4.1 IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LE RÉSEAU ROUTIER

L'objectif premier de cette revue de littérature est d'identifier les éléments issus de la littérature scientifique permettant d'entrevoir des mesures d'adaptation face aux changements climatiques. Ces mesures doivent être le plus possible focalisées sur le déneigement et le déglacage bien que celles sur les infrastructures routières dans leur globalité soient également considérées. Pour aborder les mesures adaptatives, il est cependant nécessaire d'identifier avant tout quelles sont les conséquences des changements climatiques pour le réseau routier.

Dans le contexte de cette revue de littérature, les changements climatiques en eux-mêmes ne seront pas examinés en détail. Selon la région, les changements climatiques et leurs impacts sur le réseau routier peuvent varier considérablement. Cette variabilité locale explique d'ailleurs comment certaines régions peuvent y voir des avantages ou des inconvénients sur le plan de la maintenance routière hivernale¹⁴.

4.2 DISTINCTIONS ENTRE VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Pour mieux identifier les impacts des changements climatiques, les impacts des variables météorologiques sur la maintenance routière hivernale doivent être initialement définis. Par définition, les variables météorologiques ont un impact direct sur le réseau routier, tant pour les usagers que pour les infrastructures routières en elles-mêmes¹⁵. Les changements climatiques, eux, ont pour effet d'influencer les statistiques de ces variables météorologiques, et donc, d'affecter leurs impacts sur le réseau routier en même temps.

Les sections suivantes explorent des impacts de ces variables météorologiques dans le contexte des infrastructures routières et des usagers du réseau routier.

4.3 IMPACTS DES VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES SUR LES INFRASTRUCTURES

Les variables météorologiques affectent particulièrement l'état des infrastructures routières par le biais de la température de l'air près de la surface et des précipitations de la région. La température de l'air a une liaison directe avec la température des

¹⁴ Arvidsson et al., 2012.

¹⁵ Rychen, 2013.

infrastructures routières. Plus la température moyenne est importante, plus la température de la chaussée risque d'être élevée. Ainsi, lors de la construction d'une infrastructure routière, la température locale doit être considérée dans le choix des matériaux utilisés, mais également du dimensionnement de la structure. Différents processus thermiques peuvent également affecter les infrastructures routières, notamment des phénomènes de dilatation ou de contraction thermique. Pour des régions plus froides où les températures peuvent descendre sous le point de congélation, il est crucial de prendre en compte les phénomènes de gel-dégel en raison de leur impact sur les infrastructures.

Pour les précipitations, les impacts sont différents selon la nature de celles-ci. Des précipitations liquides comme de la pluie vont demander un dimensionnement spécifique pour permettre l'évacuation des eaux et des matériaux avec des caractéristiques particulières pour résister à l'érosion causée par l'eau. Pour la neige, les conséquences sont assez similaires bien qu'il faille également considérer l'ajout d'abrasifs ou encore de sels pour éviter les situations glissantes menant à des accidents.

Dans la globalité, les variables météorologiques sont importantes à considérer dans la construction et la maintenance des infrastructures routières. Le tableau 5 présente un résumé des différents paramètres météorologiques et leurs impacts sur les infrastructures.

Tableau 5 - Impacts des variables météorologiques sur les infrastructures routières¹⁶

Paramètre	Impacts	Conséquences
Température de l'air	Température de chaussée	<p>Choix matériaux de chaussées (type de bitume, granulats)</p> <p>Températures pour dimensionnement (températures représentatives moyennes, max., min.)</p> <p>Performances structurelles et fonctionnelles (ornièrage, fissuration thermique, caractéristiques de surface, ressuage, vieillissement thermique des bitumes – oxydation, fatigue, adhérence, vieillissement, UV)</p> <p>Dilatation/contraction thermique (joints de ponts, chaussées en béton)</p> <p>Températures limites de réalisation des chaussées (température minimale de pose)</p>

¹⁶ Rychen, 2013.

Paramètre	Impacts	Conséquences
	Cycles gel-dégel	<p>Choix du tracé (permafrost, zones géologiquement instables, routes de glace)</p> <p>Dimensionnement au gel (profondeur de gel)</p> <p>Performances structurelles et fonctionnelles (fissuration thermique, caractéristiques de surface, fatigue, adhérence)</p>
Conditions atmosphériques	Rayonnement solaire, UV, IR, nuages	<p>Accentuation du réchauffement/refroidissement de la température de chaussée</p> <p>Accentuation du phénomène de gel-dégel</p> <p>Dimensionnement au gel (indice de radiation)</p>
Vent	Température de chaussée	Accentuation du réchauffement/refroidissement de la température de chaussée
	Événements extrêmes	Dégâts à l'infrastructure (chute d'objet sur chaussée, dégâts à ouvrages d'art)
Précipitations	Pluie	<p>Dimensionnement système d'évacuation des eaux (chaussées, tunnels, ponts)</p> <p>Capacité fondation (niveau de la nappe, érosion fondation)</p> <p>Performances structurelles et fonctionnelles (sensibilité à l'eau, érosion routes en gravier, adhérence)</p> <p>Conditions limites de réalisation des chaussées</p>
	Neige	Performances structurelles et fonctionnelles (adhérence, dégâts dus aux fondants et sels de déverglaçage)
	Événements extrêmes	Dégâts à l'infrastructure (avalanches, inondations)
	Sécheresse	Capacité portante fondation (tassement différentiel des sols asséchés)
Humidité	Humidité de l'air	Performances structurelles et fonctionnelles (sensibilité à l'eau, adhérence)

4.4 IMPACTS DES VARIABLES MÉTÉOROLOGIQUES SUR LES USAGERS DU RÉSEAU ROUTIER

Les impacts des variables météorologiques sur les usagers du réseau routier impliquent généralement des modifications au comportement de ceux-ci quant à leur sécurité. Ces variables météorologiques peuvent accentuer ou diminuer les risques que peuvent prendre les usagers de la route.

Les températures vont principalement influencer le confort de l'utilisateur, notamment en raison des températures à l'intérieur de la voiture pouvant atteindre des seuils assez élevés.

En revanche, là où les températures ont des impacts plutôt superficiels, la présence de précipitation peut sérieusement augmenter les risques présents sur la route. En condition de neige ou même d'averse intense, la visibilité est considérablement réduite. La pluie verglaçante peut modifier l'adhérence des roues du véhicule sur la route, affectant directement les conditions de conduite de l'utilisateur¹⁷. En somme, il existe une panoplie de variables météorologiques qui peuvent affecter les usagers du réseau routier.

Afin d'éviter une liste exhaustive des impacts, le tableau 6 présente un résumé des différents impacts des conditions météorologiques sur les usagers.

Tableau 6 - Impacts des variables météorologiques sur les usagers¹⁷

Paramètre	Impacts	Conséquences
Température de l'air	Confort	Confort réduit par températures élevées (augmentation de la consommation de carburant pour la climatisation des véhicules)
Conditions atmosphériques	Sécurité	Diminution de la visibilité (brouillard, rayonnement solaire) Augmentation du risque d'accidents (visibilité réduite)
	Confort	Accentuation des températures dans les véhicules Confort réduit lié à la réduction de la sécurité (brouillard, rayonnement solaire)
Vent	Sécurité	Insécurité liée à la stabilité des véhicules Risque d'objets tombant sur la route lors d'événements extrêmes

¹⁷ Rychen, 2013.

Paramètre	Impacts	Conséquences
Précipitations	Accessibilité	Accessibilité aux réseaux réduite lors d'inondations, d'avalanches neigeuses, de fortes précipitations neigeuses
	Sécurité	Diminution de la visibilité Diminution de l'adhérence route-véhicule, apparition du phénomène d'aquaplaning Présence de verglas lors de précipitations neigeuses Augmentation du risque d'accidents
	Confort	Confort réduit lié à la réduction de la sécurité
	Trafic	Diminution des vitesses, des débits de trafic, etc.
	Conditions hivernales	Augmentation de la maintenance hivernale des routes

4.5 IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES INFRASTRUCTURES

Comme discuté dans la section précédente, les variables météorologiques jouent un rôle important dans la construction des infrastructures routières. Il est nécessaire de considérer les variables météorologiques moyennes et extrêmes de la région lors de la planification de la construction d'une infrastructure. Par conséquent, des modifications de ces variables météorologiques peuvent entraîner des conséquences particulières sur les infrastructures déjà présentes sur le territoire. En suivant une approche statistique, les changements climatiques peuvent affecter les conditions météorologiques tant sur le plan de la moyenne, de la variance ou encore des extrêmes. Le réseau routier est évidemment vulnérable aux modifications des valeurs moyennes, mais les infrastructures routières sont particulièrement à risque lors de modifications des conditions météorologiques extrêmes¹⁸.

Les changements climatiques ont des impacts particuliers sur les infrastructures en raison des problèmes de dimensionnement. Généralement, lors de la planification et de la construction d'une infrastructure, on s'appuie sur les considérations historiques pour établir les normes de base. Or, dans le cas de modifications trop importantes de ces variables météorologiques, les normes établies ne seront plus adéquates lors de la réalisation de ces infrastructures routières. Ce principe est particulièrement vrai

¹⁸ Rattanachot et al., 2015.

concernant les aléas météorologiques extrêmes qui pourraient être modifiés par les changements climatiques. Les infrastructures pourraient ne plus être capables de résister aux aléas extrêmes si ceux-ci sont très accentués, tant dans leur fréquence d'apparition que dans leur intensité¹⁹. Les coûts de réparation seraient alors inexorablement plus importants.

La tableau 7 présente à cet effet une liste non exhaustive des impacts des changements climatiques sur les infrastructures.

Tableau 7 - Effets des changements climatiques sur les infrastructures¹⁹

Effet des changements climatiques	Changements des conditions environnementales	Impacts potentiels sur les infrastructures routières
Changements des températures moyennes	Augmentation des températures moyennes de chaussées	Périodes de pose des enrobés bitumineux plus longues
Changements des températures minimales extrêmes	Augmentation des températures minimales	Périodes de gel moins nombreuses, zones de permafrost moins grandes, élévation de la limite d'enneigement Meilleure adhérence véhicule - route
Changements des températures maximales extrêmes	Augmentation des températures maximales	Dégradations accélérées de certaines performances structurales et fonctionnelles (orniérage, ressuage, vieillissement thermique des bitumes, adhérence, etc.) Expansion thermique accentuée de certains matériaux (chaussées en béton, ponts, joints, etc.)
Changements de variation journalière des températures	Augmentation de la variabilité journalière des températures de chaussées	Dégradations liées aux cycles gel-dégel accélérées (fissuration thermique, fatigue, caractéristiques de surface, etc.)
Changements des apparitions de périodes	Augmentation du nombre et de l'intensité des périodes de	Dégradations accélérées de certaines performances structurales et fonctionnelles

¹⁹ Rychen, 2013.

Effet des changements climatiques	Changements des conditions environnementales	Impacts potentiels sur les infrastructures routières
de sécheresse et de canicules	sécheresse et de canicules	(orniérage, ressuage, vieillissement thermique des bitumes, etc.) Expansion thermique accentuée de certains matériaux (chaussées en béton, ponts, joints, etc.) Conditions de construction des infrastructures plus pénibles pour les travailleurs Assèchement des sols et tassement différentiels des fondations
Changements des apparitions de périodes de froid prolongé	Diminution du nombre et de l'intensité de périodes de froid prolongé	Périodes de gel moins nombreuses, zones de permafrost moins grandes, diminution de la profondeur de gel, élévation de la limite d'enneigement Meilleure adhérence véhicule - route
Changements des précipitations moyennes en hiver	Précipitations neigeuses plus nombreuses à haute altitude Précipitations pluvieuses plus nombreuses à basse altitude	Dégradations accélérées de certaines performances structurelles et fonctionnelles (adhérence, sensibilité à l'eau, etc.) Érosion accentuée des sols et fondations de routes Risque accentué d'avalanches et de glissements de terrains
Changements des précipitations moyennes en été	Précipitations pluvieuses moins nombreuses	Assèchement des sols et tassement différentiels des fondations Périodes de pose des enrobés bitumineux plus larges
Changements des événements de précipitations extrêmes	Augmentation du nombre et de l'intensité des événements de précipitations extrêmes	Dommages aux infrastructures dus à des inondations et des érosions de sols et de fondations Risque accentué d'avalanches et de glissements de terrains

Effet des changements climatiques	Changements des conditions environnementales	Impacts potentiels sur les infrastructures routières
		Dégradations accélérées de certaines performances structurelles et fonctionnelles (adhérence, sensibilité à l'eau, fissuration, etc.)
Changements des événements de tempêtes extrêmes	Augmentation du nombre et de l'intensité de tempêtes extrêmes	Dommages aux infrastructures dus à des objets tombants, dommages aux ponts, dommages aux dispositifs extérieurs à la voie (panneaux, lumières, signaux, etc.)
Changement du niveau de la mer	Augmentation niveau de la mer	Inondations et dommages aux infrastructures à faible altitude Érosion accentuée des sols et fondations de routes

4.6 IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES USAGERS

Comme pour la section portant sur les impacts des conditions météorologiques sur les usagers, les changements climatiques risquent d'accentuer certains risques déjà présents et d'en ajouter d'autres.

Selon la région, les aléas météorologiques extrêmes pourraient devenir plus fréquents, et donc, causer davantage de problèmes sur la sécurité associée au réseau routier. Ces impacts se traduisent globalement par un risque accru d'accidents routiers.

Il est également envisageable que certaines populations se voient dans l'obligation de fuir une région pour cause de conditions climatiques invivables, et donc, que ces mouvements de population entraînent des conséquences sur la circulation²⁰.

Sans citer toutes les conséquences des changements climatiques côté usagers, on peut imaginer des modifications sur les vitesses des véhicules, des pertes de contrôles plus fréquentes en raison de l'état des routes, des variations de pression pour les pneus des véhicules ou simplement des fermetures de routes en raison d'une maintenance inadéquate²¹.

²⁰ Rychen, 2013.

²¹ Wang et al., 2020.

Le tableau 8 présente une liste des conséquences des changements climatiques sur le comportement des usagers. En somme, ces impacts jouent un rôle considérable sur la sécurité routière, mais également sur les choix de transport²².

Tableau 8- Effets des changements climatiques sur les usagers²³

Effet des changements climatiques	Changements des conditions environnementales	Impacts potentiels sur le trafic et les usagers
Changements des températures moyennes	Augmentation des températures moyennes de chaussées	
Changements des températures minimales extrêmes	Augmentation des températures minimales	Accroissement de la sécurité et du confort grâce à une meilleure adhérence véhicule - route Accroissement des limitations d'accessibilité aux routes sur glace
Changements des températures maximales extrêmes	Augmentation des températures maximales	Réduction du confort à cause d'une dégradation accentuée des routes Réduction du confort dans les véhicules et les transports publics
Changements de variation journalière des températures	Augmentation de la variabilité journalière des températures de chaussées	Réduction du confort à cause d'une dégradation accentuée des routes
Changements d'apparition de périodes de sécheresse et de canicules	Augmentation du nombre et de l'intensité de périodes de sécheresse et de canicules	Réduction du confort à cause d'une dégradation accentuée des routes Réduction du confort dans les véhicules et les transports publics Augmentation du risque de feux de forêt Augmentation de l'apparition du smog estival

²² Matthews et al., 2021.

²³ Rychen, 2013.

Effet des changements climatiques	Changements des conditions environnementales	Impacts potentiels sur le trafic et les usagers
Changements d'apparition de périodes de froid prolongé	Diminution du nombre et de l'intensité de périodes de froid prolongé	Accroissement de la sécurité et du confort grâce à une meilleure adhérence véhicule - route
Changements de précipitations moyennes en hiver	Précipitations neigeuses plus nombreuses à haute altitude Précipitations pluvieuses plus nombreuses à basse altitude	Réduction de la sécurité et du confort à cause d'une moins bonne adhérence véhicule - route Diminution des vitesses, des charges de trafic, etc. Accentuation du risque d'avalanches et de glissements de terrains Augmentation de la maintenance hivernale à haute altitude et diminution à basse altitude
Changements de précipitations moyennes en été	Précipitations pluvieuses moins nombreuses	Accroissement de la sécurité et du confort grâce à une meilleure adhérence véhicule - route
Changements des événements de précipitations extrêmes	Augmentation du nombre et de l'intensité d'événements de précipitations extrêmes	Risque accentué d'avalanches, de glissements de terrains et d'inondations Réduction de la sécurité et du confort à cause d'une moins bonne adhérence véhicule - route Diminution de l'accessibilité aux réseaux routiers Diminution des vitesses, des charges de trafic, de la visibilité, etc.
Changements des événements de tempêtes extrêmes	Augmentation du nombre et de l'intensité de tempêtes extrêmes	Réduction de la sécurité et du confort à cause d'objets tombants sur la route et à l'instabilité des véhicules par vents forts Diminution de l'accessibilité aux réseaux routiers Diminution des vitesses, des charges de trafic, de la visibilité, etc.
Changements du niveau de la mer	Augmentation du niveau de la mer	Accentuation du risque d'inondations Diminution de l'accessibilité aux réseaux routiers

4.7 SYNTHÈSE

Inévitablement, les changements climatiques vont demander des modifications dans la gestion des infrastructures routières, que ce soit en matière d'adaptation ou de maintenance²⁴. Les changements climatiques risquent d'augmenter les vulnérabilités des infrastructures aux aléas météorologiques comme expliqué dans les sections précédentes. Les façons de concevoir, de construire et de maintenir les infrastructures routières devront être revues en incorporant une vision sur le long terme en raison de leur durée de vie²⁵.

Il demeure important de rappeler que les changements climatiques n'auront pas les mêmes impacts sur la maintenance routière hivernale partout dans le monde. Certaines régions verront une réduction des coûts associés à cette maintenance en raison d'hivers plus courts et moins rigoureux. Par exemple, une étude portant sur la ville de Calgary présente à la fois des impacts négatifs et positifs concernant les changements climatiques²⁶. En raison d'hivers plus courts, la maintenance routière hivernale nécessaire serait plus faible. En revanche, une réduction du matériel associé à la maintenance hivernale pourrait conduire à des manques en cas d'aléas extrêmes. Également, les changements climatiques occasionneraient une certaine détérioration accrue de la chaussée en raison des extrêmes plus importants²⁶.

Les mesures d'adaptation concrètes face aux changements climatiques, dans le domaine routier, sont cependant assez rares. Ce type de problème est récent et n'est généralement pas une priorité publique, d'autant plus que les modèles climatiques ne sont pas spécifiquement adaptés à la prise de décision²⁷.

²⁴ Schweikert et al., 2014.

²⁵ Picketts et al., 2015.

²⁶ Timilsina & Kralovic, 2013.

²⁷ Picketts et al., 2015.

5 MESURES D'ADAPTATION

Pour réduire les impacts des changements climatiques sur le déneigement et le déglçage, il est nécessaire d'appliquer des mesures d'adaptation concrètes. Sur le plan scientifique, différents auteurs proposent des solutions ou encore des méthodes pour adapter les opérations aux nouvelles conditions climatiques. Certaines de ces solutions, davantage théoriques, sont des méthodes d'analyse pour identifier les risques associés aux changements climatiques. Cependant, on retrouve également des exemples concrets de mesures d'adaptation ayant été mis en place lors des années précédentes pour améliorer la qualité de la maintenance hivernale routière. Cette section vise à présenter différentes mesures d'adaptation mises en place ou qui vont l'être dans les prochaines années.

5.1 GUIDE DES BONNES PRATIQUES : ÉPANDAGE

L'épandage de fondants est une mesure préventive permettant de limiter la dégradation des conditions de la chaussée en favorisant la fonte de la neige. Les interventions d'épandage sont particulièrement importantes lors de phénomènes de verglas ou de neige particulière²⁸.

L'épandage de sel vise avant tout à abaisser le point de congélation pour prévenir le gel de l'eau et pour favoriser la fonte de la neige. En revanche, le sel peut également abaisser la température de la chaussée, et donc, entraîner le regel des éléments liquides. Par conséquent, il est important d'effectuer un premier raclage pour retirer la majorité de l'accumulation de la neige. La couche résiduelle restante peut ensuite être traitée avec du sel pour augmenter la teneur en eau et favoriser la fonte de celle-ci²⁸.

Les opérations d'épandage de sel ont des impacts considérables sur l'environnement affectant l'eau, le sol, la végétation et même les infrastructures routières. L'augmentation de la concentration de sel dans le sol peut mener à des modifications structurelles du sol. Celui-ci est alors moins perméable et plus dense, ce qui affecte sa fertilité. Le sel cause également des phénomènes corrosifs avec les métaux²⁹.

L'utilisation de sel préhumidifié est une pratique courante permettant de réduire les impacts néfastes environnementaux du sel. Ce type de sel possède une humidité initiale permettant l'adhésion avec la glace pour obtenir une réaction plus rapide que pour le sel

²⁸ PIARC, 2016.

²⁹ Burtwell, 2001.

sec. Il possède également une meilleure adhérence avec la route réduisant les risques de quitter le sentier du réseau routier pour affecter l'environnement. Bien que cette propriété soit en lien avec l'humidification du sel, il serait également possible que ce soit en lien avec la taille des particules. Les particules de sel préhumidifié sont plus petites que pour le sel sec, ce qui pourrait expliquer partiellement l'adhérence plus importante. Les désavantages du sel préhumidifié concernent principalement les coûts plus élevés pour implémenter les technologies nécessaires³⁰.

Le sel sec est plutôt utilisé à des fins curatives. Pour que le processus s'enclenche, il doit absorber une certaine quantité d'humidité. Cependant, les risques de pertes de sel sont importants³¹.

Il est également possible d'utiliser des matériaux alternatifs pour augmenter l'efficacité de la maintenance hivernale. Il est cependant très important de respecter les normes établies lors de l'utilisation de matériaux particuliers.

Le sable chaud et humide a été étudié en Norvège pour remplacer le sel³¹. La ville d'Umeå a utilisé le sable chaud pendant les hivers 2010-2011 et 2011-2012 et a comparé les résultats avec les hivers précédents. Il a été jugé que le niveau d'adhérence avec le sable chaud était plus élevé sur de plus longues périodes. Il était alors possible de réduire le nombre d'interventions tout en maintenant le même niveau d'efficacité. Cela étant dit, il est important de préciser que le sable peut geler dans la trémie et sur le disque du distributeur³¹.

D'autres produits peuvent être également considérés pour remplacer le sel : le chlorure de calcium, le chlorure de magnésium, l'acétate de potassium et l'acétate de calcium/potassium³². Ces produits alternatifs peuvent permettre de limiter les impacts négatifs sur l'environnement tout en permettant de diminuer le point de congélation.

La figure 2 présente la température eutectique de ces mêmes produits selon leur concentration. La température eutectique correspond à la température minimale pour laquelle le mélange, selon sa concentration, est dans sa phase liquide.

Parmi ces options, le chlorure de magnésium est décrit comme étant le type de sel ayant le moins d'impact corrosif sur les métaux et le moins d'impact négatif sur les végétaux. Le chlorure de magnésium peut tout de même réagir avec le ciment ce qui peut affecter la structure³².

³⁰ Burtwell, 2001.

³¹ PIARC, 2016.

³² Zhang et al., 2009.

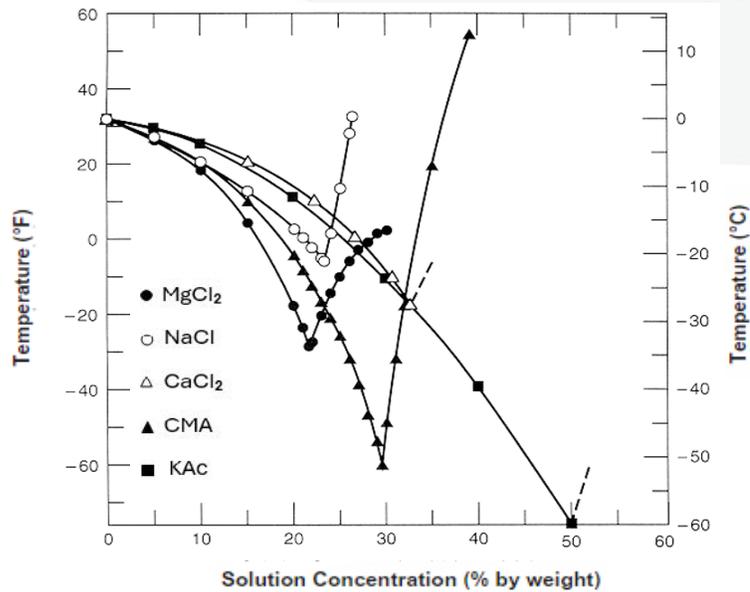


Figure 2 - Température eutectique selon la concentration du produit³³

Parmi les autres options, les acétates de potassium et de calcium/potassium sont des produits particulièrement efficaces avec des impacts minimes sur l'infrastructure routière. Leur utilisation est cependant plus coûteuse que pour le sel traditionnel. Le tableau 9 présente les coûts associés à ces produits alternatifs.

Tableau 9 - Analyse des coûts des différents produits³³

Produit de déglçage	Température	Taux d'application	Coût approximatif selon le volume	Coût approximatif selon la superficie
Chlorure de sodium (NaCl)	-10°C à 1°C	13 à 68 g/m ² (170 à 890 lb/ 12 ft lane-mile)	29 \$/m ³ (26 \$/ton)	0,0003 \$/m ²
Chlorure de calcium (CaCl₂)	-25°C	Utilisé avec du chlorure de sodium aux États-Unis	294 \$/m ³ (267 \$/ton)	0,03 \$/m ²

³³ Zhang et al., 2009.

Produit de déglacage	Température	Taux d'application	Coût approximatif selon le volume	Coût approximatif selon la superficie
Sel mélangé avec du chlorure de calcium (NaCl et CaCl₂)	-17 °C à 0 °C	21 à 50 L/m ³ de sel (5 à 12 gal/ton)	108 \$/m ³ (98 \$/ton)	0,01 \$/m ²
Chlorure de magnésium (MgCl₂)	-15 °C	8 à 11 g/m ² (100 à 150 lb/ 12 ft lane-mile)	Non disponible	0,0002 \$/m ²
Acétate de magnésium calcium (CMA)	-5 °C à 0 °C	15 à 39 g/m ² (200 à 500 lb/ 12 ft lane-mile)	738 \$/m ³ (670 \$/ton)	0,004 \$/m ²
Acétate de potassium (KAc)	-60 °C à -30 °C (concentration de 50 % à 35 % qui gèle à ces températures)	0,9 à 9,1 gal/ 1 000 ft ²	Non disponible	Non disponible

Des méthodes thermiques existent pour remplacer ou diminuer l'épandage de sel sur les routes. Ces méthodes incluent l'utilisation de béton électro conducteur, de chauffage électrique résistif, de pompes à chaleur géothermiques, de chauffage par infrarouge, d'énergie micro-ondes et d'énergie solaire/éolienne.

Ces méthodes sont brièvement présentées dans le tableau 10 et analysées sur le plan financier dans le tableau 11.

Tableau 10 - Méthodes thermiques de déglacage³⁴

Méthodes thermiques de déglacage	Description
Béton électro conducteur	Composite de fibres et copeaux d'acier mélangés au béton qui, une fois chargés électriquement, génèrent de la chaleur
Chauffage électrique résistif	Fils chauffants sous le sol qui font fondre la neige
Pompes à chaleur géothermiques	Extraction de la chaleur du sol pour la faire circuler sur la chaussée
Chauffage par infrarouge	Radiateurs montés sur la structure pour faire fondre la neige
Énergie micro-ondes et radiofréquences	Utilisation de faisceaux micro-ondes dirigés vers la neige pour la faire fondre depuis des appareils sur la structure ou des véhicules
Énergie solaire et éolienne	Cellules photovoltaïques fournissant de l'électricité alors que les éoliennes complètent l'énergie pour faire fondre la glace

Tableau 11 - Méthodes thermiques analysées financièrement³⁴

Chauffage	Coût approximatif	Consommation d'énergie	Coût opérationnel
Lampe à chaleur infrarouge	96 \$/m ² (8,9 \$/ft ²)	75 W/m ² (7 W/ft ²)	Non disponible
Câble chauffant électrique	54 \$/m ² (5 \$/ft ²)	323-430 W/m ² (30-40 W/ft ²)	4,8 \$/m ² (0,45 \$/ft ²)
Eau chaude	161 \$/m ² (15 \$/ft ²)	473 W/m ² (44 W/ft ²)	250 \$/tempête (Neige de 3 pouces)
Gaz chauffé	378 \$/m ² (35 \$/ft ²)	Non disponible	2,1 \$/m ² (0,2 \$/ft ²)
Revêtement en béton conducteur	48 \$/m ² (4,5 \$/ft ²)	516 W/m ² (48 W/ft ²)	5,4 \$/m ² (0,5 \$/ft ²)

³⁴ Zhang et al., 2009.

5.2 GUIDE DES BONNES PRATIQUES : LE DÉNEIGEMENT

Dans une optique de viabilité hivernale et de développement durable, les pratiques de déneigement doivent évoluer en respectant les contraintes environnementales. Les trois principaux aspects à considérer pour le développement durable de la maintenance hivernale routière sont l'environnement, la sécurité des usagers et les considérations sur l'évolution des pratiques³⁵.

Sur le plan environnemental, il est important que les pratiques de déneigement minimisent leurs impacts associés aux consommations énergétiques et aux rejets dans l'atmosphère.

Le dossier d'organisation de la viabilité d'hiver (DOVH) et le plan de l'exploitation de la viabilité hivernale (PEVH) abordent également les pistes permettant de réduire ses impacts sur l'environnement :

- Augmentation de la qualité du raclage pour réduire les besoins en fondant.
- Évacuation de la neige d'une chaussée pour favoriser la bonne circulation des véhicules (diminution de 10 % à 15 % de la consommation des véhicules).
- Meilleure planification de l'itinéraire des véhicules associé au déneigement (optimisation des circuits).
- Meilleur stockage de la neige.
- Maintien d'une couche de neige sur les chaussées (minimiser les chocs thermiques et les interventions d'épandage).

Sur le plan de la sécurité des opérateurs, il est principalement question que ces derniers soient bien formés pour effectuer le déneigement. Il est nécessaire d'avoir un équipement de qualité, mais également d'avoir les connaissances pour s'en servir³⁵.

Sur le plan de l'évolution des pratiques de déneigement, les mesures de déneigement doivent suivre l'évolution des demandes des usagers du réseau routier. Il est généralement demandé d'avoir des interventions de plus en plus rapides. Ce constat amène une faible quantité de neige à racler sur la chaussée. Les véhicules doivent alors disposer d'équipements adaptés aux contraintes locales. Il est également important de

³⁵ PIARC, 2016.

suivre l'évolution des recherches portant sur le comportement de la neige tombée sur la chaussée³⁶.

Les points importants à améliorer selon le guide des bonnes pratiques

- Le développement des outils de suivi ;
- Les équipements d'épandage ;
- Un meilleur contrôle de l'épandage ;
- Des épandaises suivies par GPS ;
- Une meilleure compréhension des quantités de sel résiduels sur la chaussée.

5.3 MESURES D'ADAPTATION CONCRÈTES SELON LA RÉGION

Dans un objectif de viabilité hivernale sur le long terme, il est important que les méthodes de déneigement et de déglçage évoluent selon les recherches scientifiques effectuées et les besoins des citoyens.

À ce titre, à travers le globe, il est possible de retrouver une multitude de mesures d'adaptation qui ont été appliquées ou qui vont l'être sous peu dans le domaine de la maintenance routière hivernale. Ces exemples d'adaptations ne sont cependant pas systématiquement liés aux changements climatiques, mais sont tout de même pertinents pour l'étude.

Cette section vise alors à présenter une liste non exhaustive des mesures d'adaptation selon les régions. Certaines de ces mesures nécessitent l'implémentation de nouvelles technologies, alors que d'autres sont davantage axées sur l'organisation des démarches de déneigement.

Mourmansk (Russie) : déneigement

Dans la région de Mourmansk, en Russie, des difficultés quant au déneigement sont présentes depuis quelques années. Durant l'hiver 2020, les autorités locales n'étaient pas

³⁶ PIARC, 2016.

préparées à fournir les opérations de déneigement pour les quantités de précipitation ayant eu lieu. L'accessibilité au réseau de transport était devenue difficile puisque les opérations de maintenance routière hivernale n'étaient pas adéquates à la situation³⁷. Les méthodes de retrait de la neige n'étaient pas clairement définies et la région n'avait pas suffisamment de zones de stockage pour la neige.

Par ailleurs, la Russie fait également face à des problèmes liés à l'épandage de produits nocifs pour l'environnement et les citoyens. Des mesures adaptées devraient être prises pour limiter les impacts négatifs de ces produits. Pour résoudre les problèmes d'épandage, il est suggéré d'utiliser des produits plus respectueux de l'environnement ou des technologies diverses pour éliminer la neige sur les routes.

Sur le plan opérationnel, il est suggéré de modifier l'attribution des responsabilités en lien avec le déneigement à un opérateur régional et de répartir les fonds attribués à cette initiative entre les villes concernées. Cette approche permettrait de considérer les besoins réels des villes et de les impliquer dans la démarche à suivre.

Une autre suggestion, qui suit d'ailleurs la même logique pour le Danemark ou encore le cas pour la ville de Sapporo, est d'implémenter une carte interactive en temps réel illustrant l'état de maintenance des routes³⁷.

Prince George (Canada) : programme de contrôle de la neige

Un autre exemple d'adaptation locale, cette fois-ci en Amérique du Nord, provient de la ville de Prince George. Cette dernière a mis en place un programme de contrôle de la neige et de la glace sur les routes pour minimiser les risques³⁸. Ce programme est tiré d'une multitude de projets de recherche portant sur la viabilité hivernale dans la région.

À la suite de ces études, la ville de Prince George a pris différentes mesures. Ces mesures visent à limiter les impacts environnementaux négatifs des opérations de déneigement. Pour mieux considérer les impacts des changements climatiques, la ville a imposé des politiques pour que les nouvelles infrastructures considèrent les conditions climatiques futures dans leur processus de conception. Ces mesures visent dans leur globalité à incorporer des notions de développement durable et de viabilité hivernale sur le long terme³⁸.

³⁷ Mitroshina, 2020.

³⁸ Picketts et al., 2015.

Québec (canada) : nouvelles technologies

Différentes améliorations axées sur les opérations de déneigement sont également en cours de conception dans la région du Québec.

Pour en citer quelques-unes, la remorque autopropulsée et les capteurs de précipitation sont des projets de recherches pouvant améliorer nettement la qualité de la maintenance routière hivernale. La remorque autopropulsée consiste en un véhicule permettant le déneigement sur deux voies simultanément alors que les différents capteurs visent à améliorer la détermination des conditions météorologiques en matière de neige. Ceux-ci pourront améliorer les valeurs des stations météorologiques fixes sur la quantité et le type de neige, mais également apporter de nouvelles informations, comme des capteurs permettant d'identifier les régions affectées par un brouillard de neige³⁹.

L'application de produits déglaçants sur les routes québécoises en prévision d'un événement neigeux est également un projet en cours d'étude pour évaluer ses bénéfices.

D'autres mesures sont également envisagées concernant l'organisation et la gestion interne du territoire en matière de déneigement. Parmi elles, l'un des objectifs les plus importants est de partager les connaissances dans le domaine de l'épandage d'abrasifs, de l'utilisation de sels ou encore de méthodes de déglçage, à travers notamment l'élaboration de guides³⁹.

Japon : programme de surveillance

Le Japon, dans sa globalité, utilise différentes techniques pour limiter l'accumulation de la neige sur ses infrastructures routières. Parmi celles-ci, il est notamment question de l'utilisation de systèmes chauffants adaptés pour le réseau routier. Ce système concerne principalement les trottoirs bien qu'il soit également disponible pour les routes.

Une autre technologie utilisée sur le territoire japonais consiste en des arrosoirs particuliers pour les routes. Cette technologie consiste à arroser les routes d'eau pour favoriser la fonte de la neige. Il est également possible de retrouver des gouttières à neige installées en bordure des routes pour limiter l'accumulation de précipitations solides. Ces gouttières facilitent l'évacuation rapide de la neige en assurant sa fonte grâce à l'utilisation d'eau à des températures suffisamment élevées. Le système ne peut alors pas geler malgré les températures extérieures froides³⁹.

Au Japon, plusieurs programmes de surveillance font également leur apparition pour augmenter l'efficacité de la maintenance routière. Ces programmes permettent une

³⁹ Snow and Ice Databook, 2022.

visualisation spatiale et temporelle des conditions de surface routière comme WebGIS. D'autres études portent plutôt sur le remplacement du chlorure de sodium par du propionate de sodium afin d'augmenter la durée de vie des infrastructures routières⁴⁰.

Le cas de la ville de Sapporo est également un exemple particulièrement important à considérer en matière d'adaptation à des conditions climatiques extrêmes. Comme indiqué à la figure 3, la ville de Sapporo reçoit une quantité élevée de précipitation pour des températures relativement froides. Malgré les conditions météorologiques intenses, la ville de Sapporo et son réseau routier sont très bien entretenus.

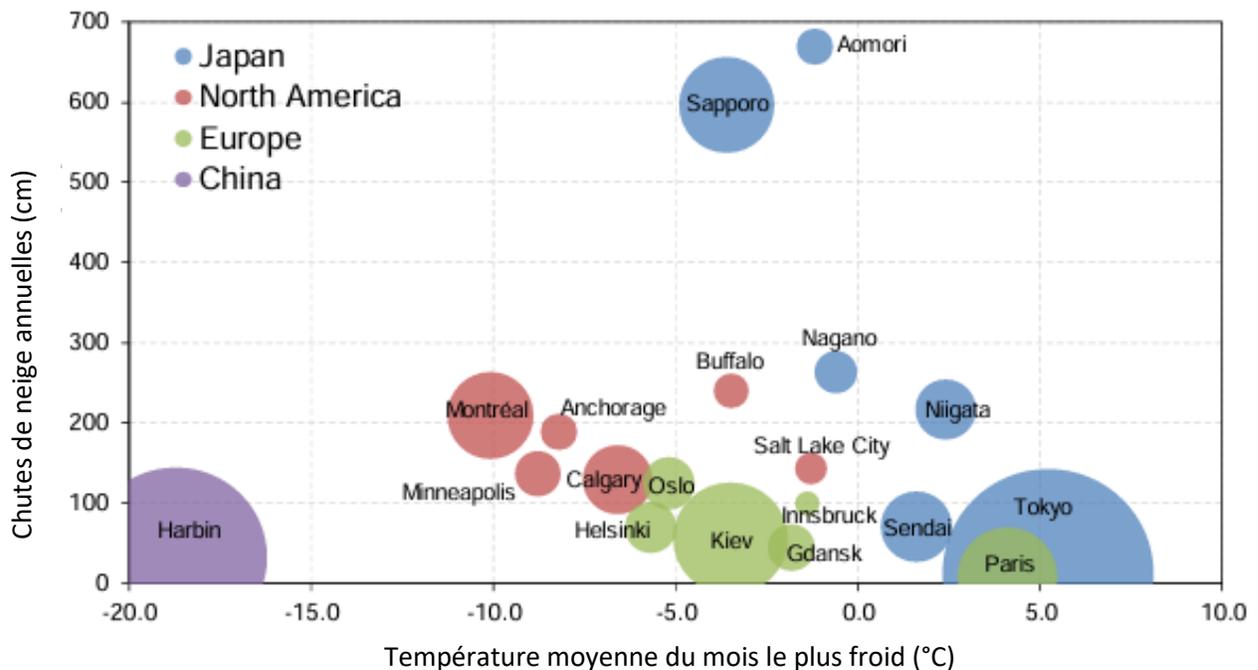


Figure 3 - Distribution des villes selon leur quantité annuelle de neige (cm) et leur température moyenne (°C) du mois le plus froid⁴⁰

Le réseau routier de la ville de Sapporo est estimé à 5 000 km de distance pour les routes destinées aux voitures et 3 200 km pour les voies pédestres. La ville utilise également autour de 4 500 machines et emploie 8 000 travailleurs pour effectuer le retrait de la neige⁴¹. Considérant la grande quantité de précipitations solides affectant cette ville, plusieurs études ont été effectuées pour mieux comprendre la grande efficacité de la ville de Sapporo pour effectuer le déneigement. Une étude relève que l'efficacité de la ville de Sapporo pour la maintenance de ses routes est due à 4 éléments distincts : le haut standard de déneigement de la ville, les instruments météorologiques, l'utilisation de

⁴⁰ Snow and Ice Databook, 2022.

Note : Pour la figure 3, la taille du cercle indique la population de la ville.

⁴¹ Kanemura, 1998.

prévisions météorologiques spécifiques et l'utilisation du *Snowfall Information System (SIS)*⁴².

Bien que cette étude soulève plusieurs facteurs expliquant l'efficacité de la ville pour maintenir son réseau routier, la simple utilisation du *SIS* permet de comprendre pourquoi la ville de Sapporo est performante sur la maintenance routière. Le *SIS* est un système permettant de combiner les informations météorologiques tirées de stations locales avec les conditions des infrastructures routières de la ville. Le service météorologique japonais informe des risques de précipitations solides et d'autres phénomènes météorologiques. D'autres instruments et stations sont également utilisés pour renseigner la ville sur les températures des infrastructures routières. De plus, la ville de Sapporo a accès à des prévisions météorologiques locales à court terme qui sont directement communiquées avec le département assurant la maintenance des routes⁴². Ces conclusions ont par ailleurs été tirées du cas extrême de l'hiver 1995-1996 où le taux de précipitation horaire était estimé à des valeurs supérieures à 10 cm/h durant la nuit du 8 au 9 janvier 1996.

Danemark : maintenance hivernale

Le réseau routier du Danemark est l'un des réseaux de transport les plus denses de toute l'Europe. La densité du réseau est évaluée à 1,74 km d'infrastructures routières par km²⁴³. Par conséquent, il est impératif pour le Danemark de bien maintenir son réseau de transport. La grande majorité des routes est administrée et maintenue par les autorités locales, mais la partie la plus utilisée du réseau routier selon le trafic quotidien reste administrée par l'État.

Les conditions climatiques affectant le Danemark sont particulièrement propices à la formation de conditions routières glissantes. Les températures frôlent très souvent 0 °C et peuvent donc mener à la formation de cycle de gel-dégel.

L'utilisation préventive de sels est un sujet très important au Danemark à tel point que le pays utilise un index particulier pour définir la rigueur de l'hiver. Cet index permet entre autres de mieux définir les quantités de sels et d'abrasifs à utiliser selon les conditions météorologiques. Celui-ci prend en considération différentes variables météorologiques principalement axées sur les températures et les précipitations pour évaluer à quel point l'hiver est intense⁴³.

Le Danemark utilise également différentes technologies pour permettre un suivi adéquat des conditions routières et prévenir l'état glissant des routes. Comme pour le cas de

⁴² Kanemura, 1998.

⁴³ Snow and Ice Databook, 2022.

Sapporo, le Danemark coopère activement avec le service météorologique, dans le cas ici, le *Danish Meteorological Institute (DMI)*. Cette coopération permet d'utiliser différentes stations météorologiques locales et différentes prévisions pour mieux identifier les décisions à prendre.

Le Danemark utilise également le *Road Weather Information System (VejVejr)* pour surveiller et évaluer les besoins des infrastructures routières. L'un des avantages importants de ce système est la possibilité de prévoir l'état glissant des routes. Dans l'ensemble, ce système utilise 470 stations météorologiques disposées sur les infrastructures routières. Le Danemark suit également la tendance dans l'amélioration de la surveillance et du suivi de la maintenance hivernale routière par différents programmes informatiques. L'ensemble de leur véhicule destiné à la maintenance est par ailleurs équipé d'un GPS permettant de suivre leur progression en temps réel.

Le projet *ROad STate MONitoring System (ROSTMOS)* vise également à un meilleur suivi de l'état des routes en considérant les variables météorologiques impactant les infrastructures routières. Un projet issu de la coopération des pays nordiques souhaite associer des variables météorologiques aux conditions routières. De nombreuses recherches portent également sur l'utilisation optimale des sels pour réduire les surfaces glissantes. Ces projets visent entre autres à identifier les corrélations entre la vitesse des véhicules et les paramètres associés à l'utilisation des sels et des abrasifs⁴⁴.

Finlande : indice de friction

La Finlande, comme le Danemark, fait également partie des membres participants du *ROSTMOS* et est active dans l'amélioration de la maintenance hivernale. La Finlande est particulièrement impliquée dans le développement d'outils pour évaluer la friction des pneus en fonction des conditions routières⁴⁴. En 2000, un projet du nom de *Web Road Weather* a été lancé pour faciliter l'accès aux informations météorologiques routières pour les intervenants sur le réseau routier. L'application offre un accès sécurisé aux informations météorologiques pour faciliter l'entretien des routes⁴⁵.

Oslo (Norvège) : système de fonte de la neige

Pour écarter de manière définitive les problèmes de stockage de la neige, la ville d'Oslo, en Norvège, utilise l'énergie de l'eau de la mer pour faire fondre la neige. Cette approche est particulièrement efficace et surtout respectueuse de l'environnement. Une fois la

⁴⁴ Snow and Ice Databook, 2022.

⁴⁵ Toivonen & Kantonen, 2004.

neige fondue, elle est nettoyée de ces contaminants pour être rejetée dans le fjord d'Oslo⁴⁶.

Nouvelle-Zélande : acétate de calcium potassium

Des études en Nouvelle-Zélande ont été faites dans le but d'évaluer les effets de l'acétate de calcium potassium pour limiter les impacts sur l'environnement tout en assurant une certaine qualité dans la maintenance routière hivernale. Sur une période de 5 ans d'utilisation de l'acétate de calcium potassium, aucun impact environnemental n'a pu être associé avec le produit. L'utilisation de l'acétate de calcium potassium entraîne une diminution du nombre d'accidents routiers en hiver, ainsi qu'une réduction du temps de transport et des périodes de fermeture des routes. Ces comparaisons ont été effectuées dans les conditions routières où aucun fondant chimique n'a été utilisé. À la suite de la phase d'essai de l'acétate de calcium potassium, il a été décidé de prolonger son utilisation sur une période de 11 ans afin de poursuivre les recherches⁴⁷.

5.4 LIMITE DES MÉTHODES D'ADAPTATION

La conception de méthodes d'adaptation concrètes aux changements climatiques fait face à divers problèmes. La plupart des études actuelles sont focalisées exclusivement sur le très court terme et les outils utilisés ne sont généralement pas développés dans l'objectif d'une application directe sur le réseau de transport. De plus, les modèles climatiques ne suggèrent pas de solution standardisée pour les décideurs⁴⁸.

Pour surmonter ces limites, l'une des approches les plus prometteuses est la réalisation d'analyses approfondies qui seraient adaptées à différents modes de transport, notamment le transport routier. L'objectif proposé serait de quantifier les compromis entre les coûts initiaux et les avantages à long terme. La planification des mesures d'adaptation faces aux changements climatiques demande des connaissances précises sur l'amélioration de la résilience des transports, la réduction des incertitudes climatiques, et la sélection rationnelle des stratégies d'adaptation⁴⁸.

⁴⁶ PIARC, 2016.

⁴⁷ Burkett & Gurr, 2004.

⁴⁸ Wang et al., 2020.

6 OUTILS ET NOUVELLES TECHNOLOGIES

Bien que la section précédente présente une multitude de mesures d'adaptation menant à l'amélioration de la maintenance routière hivernale, la plupart de ces mesures ne sont pas directement en lien avec les changements climatiques. Il existe cependant plusieurs outils plus adaptés à cette thématique permettant une meilleure visualisation des conséquences des changements climatiques sur la viabilité hivernale. Ces outils sont souvent des approches théoriques appliquées à des échelles locales.

6.1 WINTER SEVERITY INDEX (WSI)

La difficulté la plus importante dans le domaine de la maintenance routière hivernale est associée aux incertitudes des conditions météorologiques hivernales⁴⁹. La variabilité des aléas météorologiques québécois provient principalement des variations spatiales en lien avec la topographie ou encore à la présence de sources d'eau⁵⁰. Ces paramètres contribuent à la formation de fluctuations importantes du climat et ont des impacts directs sur la maintenance routière.

Il est fréquent de planifier le budget de la maintenance hivernale en fonction des moyennes climatologiques. Or, en cas de fortes variabilités climatiques interannuelles comme dans le sud du Québec, il est nécessaire d'utiliser diverses méthodes pour faciliter la prévision saisonnière⁵⁰.

La création d'un index hivernal peut justement faciliter la gestion de la maintenance routière hivernale.

Dans sa définition la plus simple, un index hivernal permet la comparaison spatiale et temporelle des hivers en fonction de variables sélectionnées. En d'autres mots, l'index vise à quantifier la rigueur de l'hiver. Les paramètres les plus importants pour le domaine de la maintenance routière hivernale sont la température de surface des routes, les précipitations et l'humidité de l'air⁵¹.

Il existe un grand nombre d'index visant à catégoriser les hivers selon leur rigueur. Certains de ces index se concentrent davantage sur l'évaluation des sels et des abrasifs.

⁴⁹ Matthews et al., 2021.

⁵⁰ Li, 2000.

⁵¹ Thornes, 1993.

Ceux-ci sont d'ailleurs fortement utilisés dans la région du Danemark comme abordé préalablement.

Autrement, le *Winter Severity Index (WSI)* développé par Matthews et al. (2021) permet d'évaluer la rigueur hivernale sur une base quotidienne en considérant les conditions météorologiques. Le *WSI* est un outil particulièrement utile pour évaluer la sévérité des conditions hivernales, mais également pour estimer les besoins à venir en activités de maintenance hivernale par l'utilisation de variables météorologiques futures provenant des projections climatiques. L'estimation de la maintenance hivernale future est directement tirée de l'existence d'une relation entre le *WSI* et la maintenance routière requise selon les conditions météorologiques. Cette application peut alors jouer un rôle important dans la planification de stratégies d'adaptation face aux changements climatiques⁵². La ville de Prince George mentionnée précédemment est d'ailleurs l'une des villes ayant utilisé le *WSI* afin d'entamer des discussions sur l'adaptation possible⁵³.

Selon la région d'étude, l'utilisation d'un certain index hivernal peut s'avérer être plus efficace qu'un autre. Par exemple, une étude portant sur la maintenance routière hivernale en Ontario a révélé que le *Strategic Highway Research Program (SHRP)* index était le plus pertinent considérant la large variabilité climatique de la région. Suivant des modifications pour mieux adapter l'index à la région d'étude, l'index SHRP modifié permet l'analyse spatiale et temporelle de la rigueur hivernale en liant celle-ci avec l'utilisation de sels et d'abrasifs en plus de la maintenance hivernale routière⁵⁴.

6.2 INFRASTRUCTURE PLANNING SUPPORT SYSTEM (IPSS)

Un autre outil permettant de faciliter la prise de décision en matière de changements climatiques est l'*Infrastructure Planning Support System (IPSS)*.

Celui-ci se focalise sur la maintenance routière en utilisant une approche holistique. C'est un outil qui propose différentes méthodes de gestion à long terme en considérant les impacts des changements climatiques sur les infrastructures routières⁵⁵.

L'*IPSS* est en mesure d'analyser n'importe quelle projection climatique sur l'ensemble de la planète. Contrairement à d'autres outils du même genre, celui-ci vise une utilisation

⁵² Matthews, 2021.

⁵³ Picketts et al., 2015.

⁵⁴ Li, 2000.

⁵⁵ Schweikert et al., 2014.

par des décideurs dans le domaine des infrastructures routières. Il est simple à prendre en main par sa quantité minimale de paramètres à fournir, mais propose tout de même une analyse détaillée, se focalisant sur les changements climatiques, les problèmes d'inondation, et les conséquences financières et sociales portant sur le réseau de transport⁵⁵. Pour chaque année projetée, les impacts climatiques ressentis par les infrastructures sont évalués en considérant neuf types de routes distinctes.

6.3 ROAD WEATHER INFORMATION SYSTEM (RWIS)

Parmi la liste des mesures d'adaptation décrites, l'apparition des *Road Weather Information Systems (RWIS)* est l'une des plus importantes.

Ces systèmes permettent de mesurer plusieurs variables d'état des infrastructures routières en plus de jouer un certain rôle dans la prévision de l'état des routes⁵⁶. Un RWIS utilise des données provenant d'instruments météorologiques, mais également de capteurs sur les infrastructures routières.

Les informations fournies par ces instruments permettent au système d'effectuer des prévisions allant jusqu'à 24 heures dans le futur⁵⁷. Des mesures préventives peuvent alors être envisagées afin d'optimiser la maintenance routière en cas d'altération de l'état des routes. Afin d'avoir une plus grande qualité dans les prévisions de ces systèmes, l'utilisation d'un *Value-Added Meteorological Service (VAMS)* est généralement recommandée. Un VAMS permet l'utilisation de différentes prévisions météorologiques locales à court terme pour faciliter la prise de décisions en matière de maintenance hivernale⁵⁷.

6.4 SCHÉMAS THÉORIQUES

Parmi les schémas d'adaptation théoriques abordant les mesures d'adaptation face aux changements climatiques, Rattanachot et al. (2015) proposent un schéma d'adaptation face aux changements climatiques développé en quatre sections distinctes (figure 4). Ce schéma permet ultimement la formulation de stratégies d'adaptation en considérant de multiples facteurs.

⁵⁶ Li, 2000.

⁵⁷ Boselly et al., 1993.

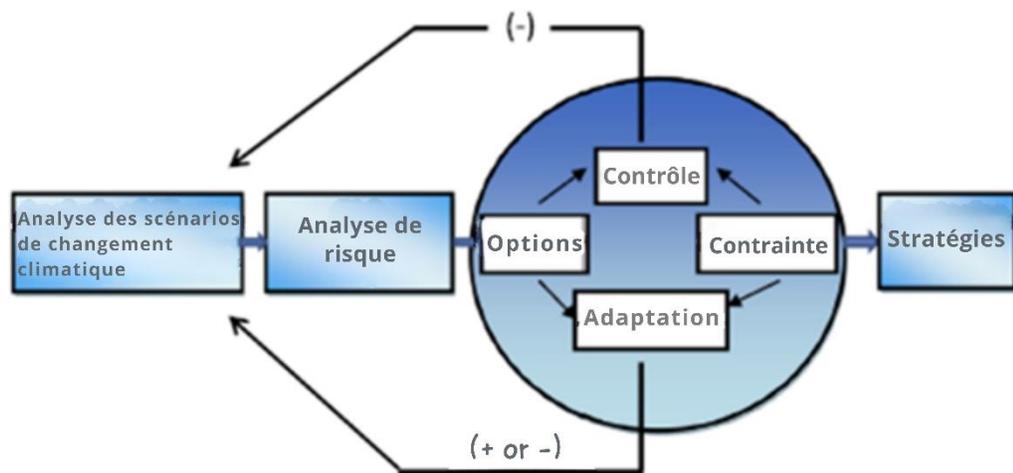


Figure 4 - Schéma d'adaptation proposé

La première section du schéma porte sur l'analyse des différents scénarios de changements climatiques. Une panoplie de paramètres peut être considérée, notamment sur les concentrations de gaz à effet de serre. Cette étape fondamentale permet d'accéder à la suite de l'analyse.

La seconde section utilise les projections climatiques pour identifier les risques associés aux infrastructures routières. L'approche utilisée, purement statistique, estime les probabilités que certains risques surviennent.

Dans un troisième temps, différents types de solutions sont envisagés. Rattanachot et al. (2015) séparent ces solutions en deux catégories : les mesures d'adaptation et les mesures de contrôle. Les mesures de contrôle visent une forme proactive permettant de lutter contre les changements climatiques par des réductions des émissions de gaz à effet de serre, alors que les mesures d'adaptation se focalisent sur l'amélioration des infrastructures routières pour réduire les risques. Évidemment, toutes ces options doivent considérer des contraintes bien souvent financières.

La quatrième section consiste à établir les stratégies d'adaptation en fonction des paramètres étudiés préalablement.

D'autres études viennent suggérer des stratégies d'adaptation, toujours théoriques, mais moins spécifiques. Par exemple, Abreu et al. (2022) recommandent une approche en quatre étapes : la planification, la surveillance, la maintenance et les actions correctrices. Ces différentes sections sont décrites dans le tableau 12.

Tableau 12 - Liste des mesures d'adaptation

Type de mesures	Mesures d'adaptation
Planification	<p>Création d'approches d'adaptation dynamiques.</p> <p>Intégration de clauses d'adaptation dans les investissements nationaux.</p> <p>Transparence et coordination entre les différentes agences de transport.</p> <p>Développement de politiques et de législations sensibles au climat.</p> <p>Investissement précoce dans des infrastructures publiques de haute qualité pour assurer la résilience à long terme.</p> <p>Participation et engagement des parties prenantes pour répondre aux besoins d'adaptation climatique.</p> <p>Intégration de la résilience aux changements climatiques dans la planification gouvernementale locale.</p>
Surveillance	<p>Évaluation quantitative des coûts économiques des impacts locaux et mondiaux des changements climatiques.</p> <p>Attention particulière à l'adaptation dans les itinéraires d'évacuation critiques.</p> <p>Surveillance des autoroutes, ponts et systèmes de drainage.</p> <p>Examen périodique des cartes de risques.</p> <p>Amélioration des capacités de prévision météorologique.</p> <p>Inspection plus fréquente des sites affectés.</p>
Maintenance	<p>Réexamen des caractéristiques de sécurité des infrastructures et évaluation des risques associés.</p> <p>Minimisation des pertes et augmentation de l'efficacité dans la surveillance des infrastructures.</p> <p>Renforcement de la capacité d'adaptation de manière évolutive et diversifiée.</p>
Action correctrice	<p>Priorisation des travaux correctifs pour les sites jugés les plus à risque d'interruption de service.</p> <p>Accroissement de la résilience dans la phase de renouvellement des actifs.</p> <p>Relocalisation des routes critiques.</p>

CONCLUSION

L'un des objectifs finaux de ce mandat de recherche était d'identifier des mesures d'adaptation concrètes pour la région du sud du Québec. Suivant la revue de littérature, différentes analyses scientifiques ont été présentées et pourraient alors être utilisées à l'échelle locale pour y identifier les mesures d'adaptation en matière de maintenance hivernale routière.

À travers cette revue de littérature, la nécessité d'adapter les pratiques de déneigement et de déglçage aux changements climatiques est évidente. Les changements climatiques vont entraîner des modifications dans les conditions météorologiques locales, ce qui affectera à son tour les opérations de maintenance routière hivernale. Des phénomènes de pluie verglaçante pourraient alors être plus fréquents selon les températures de la région. Pour adapter les services de déneigement et de déglçage face aux changements climatiques et aux enjeux environnementaux, des solutions variées sont envisagées.

Sur le plan de l'épandage de fondants, il est déjà question pour certaines villes de remplacer le sel de voirie par des alternatives moins néfastes pour l'environnement. Ces alternatives incluent des fondants chimiques adaptés aux besoins locaux, mais également des méthodes thermiques novatrices pour faire fondre la glace. Le choix de la méthode doit être effectué en considérant les facteurs géographiques, économiques et environnementaux de la région pour déterminer l'approche la plus appropriée⁵⁸. Les opérations de déneigement doivent également évoluer sous le thème de la viabilité hivernale pour augmenter la qualité des services. La surveillance de l'état des routes par le biais d'instruments météorologiques fait partie des solutions suggérées pour réduire les coûts associés à la maintenance routière hivernale⁵⁹.

Des exemples régionaux démontrent des approches adaptatives spécifiques, mettant justement l'accent sur la durabilité environnementale, l'intégration de technologies avancées et une coopération étroite avec les services météorologiques. Certaines villes dans la région du sud du Québec ont déjà appliqué des réformes du service de maintenance routière hivernale en renforçant la viabilité hivernale sur le long terme. Ces politiques visent à réduire les émissions de gaz à effet de serre en optimisant le trajet des véhicules affectés au déneigement et à réduire l'utilisation de sel. Une majorité de municipalités québécoises utilisent également des services pouvant s'apparenter à un RWIS par le biais de Météo Routes. Ces services fournissent des prévisions météorologiques associées à l'état des routes. Un grand nombre de municipalités

⁵⁸ Zhang et al., 2009.

⁵⁹ PIARC, 2016.

québécoises utilisent encore le sel de voirie sec. Il serait alors possible, à l'aide d'études locales, d'évaluer la possibilité de remplacer le sel de voirie par un produit chimique plus respectueux de l'environnement. Ces études demandent de considérer les paramètres locaux pour obtenir un résultat adapté à la région.

Cependant, des limites subsistent quant à l'identification des impacts des changements climatiques, nécessitant une approche approfondie pour guider les décisions futures. Différents outils existent et visent à mieux identifier la manière dont les changements climatiques vont affecter la maintenance routière hivernale. C'est notamment le cas du *Winter Severity Index (WSI)* appliqué à une échelle locale pour établir un lien entre la rigueur des hivers futurs et la maintenance routière hivernale.

Ce premier livrable n'a pas abordé la thématique des changements climatiques à l'échelle régionale pour la région du sud du Québec. Ce point sera examiné d'une manière approfondie dans les prochains rapports du mandat de recherche.



ANNEXE

ANNEXE 1 : QUESTIONNAIRE FOURNI AUX VILLES PARTICIPANTES

1. Quels sont les seuils et circonstances pour envoyer les services de déneigement et de déglçage ?

2. Quelles sont les mesures entreprises par la ville pour suivre l'état des routes lors d'une tempête ?

3. Est-ce que la ville possède des stations météorologiques ? Si oui, est-ce que l'on pourrait obtenir les données ?

4. Y-a-t-il des critiques de la part des citoyens ?

5. Quels sont les enjeux importants liés à la ville ?



BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

Abreu, V. H. S., Santos, A. S., & Monteiro, T. G. M. (2022). Climate change impacts on the road transport infrastructure: A systematic review on adaptation measures. *Sustainability*, *14*(14), 8864.

Arvidsson, A., Blomqvist, G., & Öberg, G. (2012). Impact of climate change on use of anti-icing and deicing salt in Sweden. In *Winter maintenance and surface transportation weather: international conference on winter maintenance and surface transportation weather* (Vol. 30, pp. 3-10). Coralville: IA.

Boselly, S. E., Thornes, J., Ulberg, C., & Ernst, D. (1993). Road weather information systems, volume i. Strategic Highway Research Program Publication-SHRP-H-350, National Research Council, Washington, DC, 90-93.

Burkett, A., & Gurr, N. (2004). Icy roads management with calcium magnesium acetate to meet environmental and customer expectations in New Zealand. In *Transportation Research Board (Ed.), Proc. 6th Intl. Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology*. Transportation Research Circular E-C063: Snow and Ice Control Technology. SNOW04-050 (pp. 267-277).

Burtwell, M. (2001). Assessment of the performance of prewetted salt for snow removal and ice control. *Transportation research record*, *1741*(1), 68-74.

Climate Data. (2022). Climat Montréal. Climate Data. <https://fr.climate-data.org/amerique-du-nord/canada/quebec/montreal-3704/#climate-graph>

PIARC (Comité technique 2.4) – Viabilité hivernale. (2016). *Sustainability and Climate Change Considerations in Winter Operations* [Technical Report]. PIARC.

Cui, D., Liang, S., & Wang, D. (2021). Observed and projected changes in global climate zones based on Köppen climate classification. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, *12*(3), e701.

Donneesclimatiques.ca (portail). (2023). Des données climatiques pour assurer l'avenir du Canada. Données Climatiques Canada. <https://donneesclimatiques.ca/>

Kanemura, N. (1998). Road snow removal and the snowfall information system in the city of Sapporo. *Transportation research record*, *1627*(1), 34-40.

Li, J. (2000). A winter index for benchmarking winter road maintenance operations on Ontario highways. Wilfrid Laurier University, 145.

Matthews, L., Andrey, J., Fletcher, C., & Oozeer, Y. (2021). The development of climate services to inform decisions about winter maintenance at different timescales. *Climate Services*, 22, 100232.

Mitroshina, M. (2020). Improving snow removal efficiency in Arctic cities. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 539, No. 1, p. 012067). IOP Publishing.

Picketts, I. M., Andrey, J., Matthews, L., Déry, S. J., & Tighe, S. (2016). Climate change adaptation strategies for transportation infrastructure in Prince George, Canada. *Regional environmental change*, 16, 1109-1120.

Posey, J. (2012). Climate change impacts on transportation in the Midwest. US national climate assessment midwest technical input report. [Winkler J, Andresen J, Hatfield J, Bidwell D, Brown D, coordinators].

Rattanachot, W., Wang, Y., Chong, D., & Suwansawas, S. (2015). Adaptation strategies of transport infrastructures to global climate change. *Transport Policy*, 41, 159-166.

Rychen, P. (2013). Impact du changement climatique sur les infrastructures routières (No. THESIS). EPFL.

Schweikert, A., Chinowsky, P., Kwiatkowski, K., & Espinet, X. (2014). The infrastructure planning support system: Analyzing the impact of climate change on road infrastructure and development. *Transport Policy*, 35, 146-153.

Snow and Ice Databook. (2022). Technical Committee 3.2, Winter Service. PIARC.

Thornes, J. E. (1993). Cost-effective snow and ice control for the 1990s. *Transportation Research Record*, (1387), 185-190.

Timilsina G.R., Kralovic P.R. (2005). Effets potentiels du changement de climat sur la ville de Calgary : S'adapter à un nouvel environnement
https://www.imaginecalgary.ca/library/imagineCALGARY_Climate_Change_Megatrend_Paper.pdf

Toivonen, K., & Kantonen, J. (2004). Finnish Road Administration's Web Road Weather Project. In *Transportation Research Circular E-C063: 6th International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology* (pp. 50-57).

Walker, C. L., Steinkruger, D., Gholizadeh, P., Hasanzedah, S., Anderson, M. R., & Esmaili, B. (2019). Developing a department of transportation winter severity index. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(8), 1779-1798.

Wang, T., Qu, Z., Yang, Z., Nichol, T., Clarke, G., & Ge, Y. E. (2020). Climate change research on transportation systems: Climate risks, adaptation, and planning. *Transportation research part D: transport and environment*, 88, 102553.

Zhang, J., Das, D. K., & Peterson, R. (2009). Selection of effective and efficient snow removal and ice control technologies for cold-region bridges. *Journal of Civil, Environmental, and Architectural Engineering*, 3(1), 1-14.



La reproduction de ce document par quelque procédé que ce soit et sa traduction, même partielles, sont interdites sans l'autorisation du CERIU.

ISBN: 978-2-925413-05-9

Tous droits réservés.

© CERIU 03/2024

La version numérique de ce document est disponible à :

www.ceriu.qc.ca/observatoire



Centre d'expertise
et de recherche
en infrastructures
urbaines



**OBSERVATOIRE
DE LA GESTION INTÉGRÉE
DE L'ESPACE PUBLIC URBAIN**

999, boul. de maisonneuve Ouest, bur. 1620
Montréal (Québec) H3A 3L4, case postale 25
Canada
514 848-9885
Observatoire@ceriu.qc.ca
www.ceriu.qc.ca