

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEL INDICE DE RIGUEUR HIVERNALE POUR LE QUÉBEC

Projet R870.1

Pr Martin Trépanier, ing., Ph.D.
Amaury Philippe, M. Ing., associé de recherche
Polytechnique Montréal

Josselin Tréhel, M. Env., chargé de projets
Association québécoise des transports (AQTr)

Réalisé pour le compte de la
Direction de l'encadrement et de l'expertise en exploitation du
ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec

Octobre 2023

Rapport final



**POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL**

UNIVERSITÉ
D'INGÉNIERIE

AQTr

L'expertise en transport

La présente étude a été réalisée à la demande du Ministère des Transports et a été financée par le Ministère.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du Ministère des Transports.

Ce projet de recherche a été effectué en collaboration avec la Table d'expertise en viabilité hivernale de l'Association québécoise des transports (AQTr), qui a formé un comité afin d'effectuer le suivi périodique des travaux de recherche.

Voici la liste des membres de ce comité de suivi :

Émilie Godbout, chargée de projet, Direction de l'encadrement et de l'expertise en exploitation (DEEE), ministère des Transports et de la mobilité durable (MTMD) ;

David Fiset, conseiller à la recherche, Direction de la coordination de la recherche et de l'innovation, MTMD ;

Alberto Cardenas, ingénieur, Ville de Montréal ;

Erik Rolland, directeur des travaux publics, Ville de Pointe-Claire ;

Carlo Cazzaro, ingénieur, chef de division voirie, Ville de Sherbrooke ;

Marco Dubé, ingénieur, Form-eval ;

Serge Hamel, Vision météo.

SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET DES RECOMMANDATIONS

Ce projet de recherche avait pour but de développer un indice de rigueur hivernale (IRH) pour le Québec. L'IRH est un moyen relativement simple de pouvoir évaluer si la période hivernale a été plus pénible que la normale en ce qui concerne les opérations de déneigement et de viabilité hivernale du réseau routier. Cet IRH est spécifique à chaque région, il est calculé à l'aide des conditions météorologiques locales, selon divers paramètres que le projet devait déterminer.

La première étape a consisté à faire une revue de littérature pour recenser les pratiques en la matière à travers le monde. Nos recherches se sont concentrées sur l'Europe, sur la partie nordique des États-Unis, puis sur le Canada, où les conditions routières sont similaires à celles du Québec. La revue a permis d'identifier une panoplie d'indices. Certains IRH ne sont calculés qu'à partir de la température de l'air, tandis que d'autres font l'objet de calculs beaucoup plus complexe, incluant les précipitations et les conditions de la chaussée, ce qui demande plus de données collectées.

L'équipe du projet a ensuite reçu et structuré des données météorologiques provenant de 9 stations météorologiques du MTMD, afin d'établir un portrait large du territoire québécois. Des données météorologiques de précipitations d'Environnement Canada ont également été ajoutées. Enfin, des données opérationnelles sur les activités de viabilité hivernale ont été obtenues du MTMD et de la ville de Pointe-Claire.

Ces données ont permis de tester différents IRH existants afin de vérifier leur applicabilité au Québec : Pologne, Ontario, SHRP, Illinois, Pennsylvanie, ainsi qu'un indice développé par l'INRS en 2014 pour le MTMD. Nos tests visaient à déterminer quels IRH étaient les mieux corrélés avec les données opérationnelles de viabilité sur une période de 4 années, soit de 2018 à 2022 (horizon disponible) ; les hivers plus rigoureux occasionnant l'utilisation accrue de ressources. Deux indices sortent du lot. D'abord, l'IRH de la Pologne, qui, paradoxalement, n'est calculé qu'avec la température de l'air. L'indice de l'Ontario, qui compartimente un certain nombre de conditions de température, de pluie verglaçante, de surface de route glacée, de chutes de neige, de temps venteux et de séquence de jours froids, atteint la meilleure corrélation avec les 9 sites expérimentés.

Enfin, nous avons appliqué une méthode d'adaptation de ces deux indices afin de faire augmenter leur corrélation avec les données opérationnelles, ce qui a permis de proposer au MTMD deux IRH qui considèrent au mieux les ressources nécessaires aux opérations de viabilité hivernale et qui permet une comparaison annuelle des ressources engagées en fonction de la rigueur des hivers, toutes choses étant égales par ailleurs. L'IRH proposé est l'indice basé sur des catégories d'événements météorologiques (ICEM). S'il n'est pas calculable, un autre indice basé uniquement sur la température (IBUT) peut être utilisé. Enfin, les indices ont été validés avec les données de la ville de Pointe-Claire.

Pour donner suite à ce projet, l'équipe recommande d'aller de l'avant avec l'utilisation des deux indices et de développer un outil permettant au MTMD de calculer ceux-ci de façon automatique à partir des données récoltées. Cela permettrait de déterminer si les corrélations observées dans la détermination des IRH se maintiennent dans le temps ou, le cas échéant, s'il faut ajuster leurs paramètres. De même, puisque les connaissances des quantités de précipitation sont essentielles au calcul de l'indice ICEM, il est recommandé que le MTMD dote ses stations météorologiques de capteurs pluviométriques afin de pouvoir calculer l'indice de manière autonome ou, si nécessaire, de collecter des données de précipitation de manière automatisée auprès d'un fournisseur. Une prochaine étape pourrait alors être la diffusion élargie des IRH, et en particulier de l'ICEM que nous recommandons en priorité, au sein du MTMD et au grand public. Cela permettrait de sensibiliser la population sur l'importance de maintenir des services de viabilité hivernale de qualité sur le territoire québécois.

TABLE DES MATIÈRES

SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET DES RECOMMANDATIONS	II
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES TABLEAUX	VI
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES ACRONYMES	IX
1 INTRODUCTION	1
2 REVUE DE LITTÉRATURE	4
2.1 LES INDICES DE RIGUEUR HIVERNALE : HISTORIQUE.....	4
2.1.1 <i>États-Unis</i>	4
2.1.2 <i>Canada</i>	5
2.1.3 <i>Québec</i>	6
2.1.4 <i>Ailleurs dans le monde</i>	7
2.2 LES INDICES ET LEURS VARIABLES.....	7
2.2.1 <i>Température</i>	9
2.2.2 <i>Neige</i>	9
2.2.3 <i>Pluie</i>	10
2.2.4 <i>Vent</i>	10
2.2.5 <i>Autres variables</i>	10
3 MÉTHODOLOGIE	11
3.1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	11
3.2 COMPILATION ET STRUCTURATION DES DONNEES	11
3.3 EXPERIMENTATION DES INDICES ET POTENTIELS DE CORRELATION.....	12
3.4 DEVELOPPEMENT D'UN NOUVEL INDICE DE RIGUEUR HIVERNALE	12
4 DONNÉES	13
4.1 DONNEES DU MTMD ET DES MUNICIPALITES.....	13
4.1.1 <i>Dates de réception des différentes données</i>	13
4.1.2 <i>Données météorologiques et routières</i>	14
4.1.3 <i>Données sur les conditions routières</i>	16
4.1.4 <i>Données sur les opérations de viabilité hivernale</i>	17
4.2 DONNEES D'ENVIRONNEMENT CANADA	18
4.2.1 <i>Présentation des données</i>	18
4.2.2 <i>Sélection des stations météorologiques adaptées</i>	21
4.3 FUSION DES DONNEES DU MTMD AVEC LES DONNEES D'ENVIRONNEMENT CANADA	
22	

4.3.1	<i>Formatage des fichiers de sortie comme outils d'analyse</i>	22
4.3.2	<i>Comparaison statistique des deux sources</i>	23
4.4	QUALITE DES DONNEES.....	23
4.4.1	<i>Limites rencontrées</i>	23
4.4.2	<i>Résolution des limites</i>	27
5	RÉSULTATS	28
5.1	SELECTION DES INDICES APPLICABLES AU CONTEXTE QUEBECOIS.....	28
5.1.1	<i>Indice du Québec – INRS</i>	28
5.1.2	<i>Indice de l'Ontario</i>	29
5.1.3	<i>Indice de l'échelle fédérale américaine - SHRP</i>	30
5.1.4	<i>Indice de l'Illinois</i>	31
5.1.5	<i>Indice de la Pennsylvanie</i>	31
5.1.6	<i>Indice de la Pologne</i>	32
5.2	EXPERIMENTATION DES INDICES	33
5.3	CORRELATIONS ENTRE LES INDICES ET LES DONNEES SUR LES OPERATIONS DE VIABILITE HIVERNALE	35
5.4	DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEL INDICE DE RIGUEUR HIVERNALE AU QUÉBEC	40
5.4.1	<i>Construction de l'Indice Basé Uniquement sur la Température (IBUT)</i>	40
5.4.2	<i>Expérimentation de l'indice IBUT</i>	43
5.4.3	<i>Construction de l'Indice basé sur des Catégories d'Événements Météorologiques (ICEM)</i>	44
5.4.4	<i>Expérimentation de l'indice ICEM</i>	47
5.5	VALIDATION AVEC LES DONNEES MUNICIPALES DE POINTE-CLAIRE.....	48
6	DISCUSSION ET CONCLUSION	51
6.1	CONTRIBUTIONS	51
6.2	LIMITATIONS	52
6.3	PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS	52
7	RÉFÉRENCES	54
8	ANNEXES	57
8.1	GRAPHIQUES BRUTS PUIS NORMALISES DES RESULTATS OBTENUS POUR LES INDICES, POUR LES STATIONS SMRF-20, SMRF-23, SMRF-24, SMRF-26, SMRF-34, SMRF-37 ET SMRF-42, ET POUR LA PERIODE DE JANVIER 2018 A DECEMBRE 2022.....	57
8.2	CORRELATION ENTRE LA VALEUR DES INDICES DE RIGUEUR HIVERNALE ET LES DONNEES OPERATIONNELLES DES CENTRES DE SERVICES ASSOCIES AUX STATIONS.....	64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Indices de rigueur hivernale recensés au sein de la littérature	8
Tableau 2: Historique de réception des différentes sources de données du MTMD.....	13
Tableau 3: Description des variables mesurées par les quatre capteurs communs à toutes les stations.....	14
Tableau 4: Description des principales variables mesurées par les capteurs additionnels	16
Tableau 5: Champs des fichiers de données de conditions routières.....	17
Tableau 6: Description des variables incluses dans les données horaires d'Environnement Canada	19
Tableau 7: Description des variables incluses dans les données quotidiennes d'Environnement Canada	20
Tableau 8: Paires de stations et distances d'écart entre leurs entités	22
Tableau 9: Statistiques sur la différence entre la température moyenne d'Environnement Canada et la température moyenne du MTMD, pour chaque paire de stations (°C)	23
Tableau 10: Disponibilité des données météorologiques pour l'année 2018.....	24
Tableau 11: Disponibilité des données météorologiques pour l'année 2019.....	25
Tableau 12: Disponibilité des données météorologiques pour l'année 2020.....	25
Tableau 13: Disponibilité des données météorologiques pour l'année 2021.....	26
Tableau 14: Disponibilité des données météorologiques pour l'année 2022.....	26
Tableau 15: Méthode de calcul de l'indice de rigueur hivernale ontarien (source : Matthews et al., 2017).....	30
Tableau 16: Directions générales territoriales et centres de services associés aux stations du Ministère	36
Tableau 17: Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles de la direction générale territoriale associée à la station SMRF-15.....	37
Tableau 18: Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles de la direction générale territoriale associée à la station SMRF-18.....	37
Tableau 19: Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles de la direction générale territoriale associée à la station SMRF-20.....	37
Tableau 20: Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles de la direction générale territoriale associée à la station SMRF-23.....	37

Tableau 21: Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles de la direction générale territoriale associée à la station SMRF-24.....	38
Tableau 22: Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles de la direction générale territoriale associée à la station SMRF-26.....	38
Tableau 23: Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles de la direction générale territoriale associée à la station SMRF-34.....	38
Tableau 24: Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles de la direction générale territoriale associée à la station SMRF-37.....	38
Tableau 25: Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles de la direction générale territoriale associée à la station SMRF-42.....	39
Tableau 26: Corrélation moyenne et médiane des indices de rigueur hivernale pour l'ensemble des stations étudiées, en utilisant les données opérationnelles des directions générales territoriales.....	39
Tableau 27: Corrélation moyenne et médiane des indices de rigueur hivernale pour l'ensemble des stations étudiées, en utilisant les données opérationnelles des centres de services	39
Tableau 28: Moyenne des corrélations des indices de rigueur hivernale pour l'ensemble des stations étudiées	40
Tableau 29 : Valeurs statistiques des différentes régressions linéaires, selon la variable d'étude	41
Tableau 30: Comparaison des valeurs du R au carré entre l'indice de la Pologne originel et l'indice final optimisé.....	42
Tableau 31 : Évolution et méthode détermination des coefficients de l'IBUT .	42
Tableau 32 : Extrait du tableau d'analyse de sensibilité pour l'optimisation de l'indice de l'Ontario : variations selon P6'.....	45
Tableau 33: Définition de l'ICEM.....	46
Tableau 34 : Structure des données opérationnelles sur le nombre d'opérations de la ville de Pointe-Claire	49
Tableau 35 : Valeurs de l'indice ICEM, de l'indice IBUT et du nombre d'opérations	49

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation géographique des stations du MTMD (en bleu) et des stations d'Environnement Canada associées (en rouge)	21
Figure 2: Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-15 (valeurs brutes).....	34
Figure 3: Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-15 (valeurs normalisées).....	34
Figure 4: Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-18 (valeurs brutes).....	35
Figure 5: Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-18 (valeurs normalisées).....	35
Figure 6 : Valeurs mensuelles de l'IBUT, de 2018 à 2022, pour les neuf stations	44
Figure 7 : Valeurs mensuelles de l'ICEM, de 2018 à 2022, pour les neuf stations	47

LISTE DES ACRONYMES

AQTr	Association québécoise des transports
CS	Centre de services
DG	Direction générale territoriale
IBUT	Indice Basé Uniquement sur la Température
ICEM	Indice basé sur des Catégories d'Événements Météorologiques
INRS	Institut national de recherche scientifique
MTMD	Ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program : <i>Programme national coopératif de recherche routière</i>
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration : <i>Administration nationale de la sécurité routière</i>
PIARC	World Road Association : <i>Association mondiale de la route</i>
RWMP	Road Weather Management Program : <i>Programme de gestion des conditions météorologiques routières</i>
SHRP	Strategic Highway Research Program : <i>Programme Stratégique de Recherche Routière</i>
USDOT	United States Department of Transportation : <i>Ministère des Transports des États-Unis</i>

1 INTRODUCTION

Au Québec, le budget consacré annuellement pour l'entretien hivernal des routes est de plusieurs centaines de millions de dollars. Avec les changements climatiques, les conditions hivernales sont de plus en plus variables, voire extrêmes, et il devient plus difficile pour le ministère des Transports et de la Mobilité durable (MTMD) et les municipalités d'expliquer les budgets alloués pour ces dépenses d'entretien. S'y ajoutent la difficulté de comprendre les quantités de matériaux (sels, abrasifs) ainsi que les ressources (équipements, personnel) requises pour effectuer les opérations. Se baser sur l'intensité des hivers passés ne semble pas efficace puisqu'il n'existe pas de manière uniformisée une façon de déterminer cette « rigueur » en termes comparables d'une année à l'autre. Le Ministère et l'Institut national de recherche scientifique (INRS) avaient développé en 2014 un indice de rigueur hivernale qui était notamment basé sur des données horaires de types de précipitations (neige d'un côté, pluie de l'autre) d'Environnement Canada. Toutefois, depuis quelques saisons, ces données sont maintenant indisponibles et l'indice est depuis inutilisable. Dans le cadre de la Table d'expertise en viabilité hivernale de l'Association québécoise des transports (AQTr), le développement d'un nouvel indice a été proposé en 2020.

Le but de ce projet de recherche est d'effectuer des expérimentations en vue de proposer un nouvel indice de rigueur hivernale pouvant être calculé et utilisé sur le territoire québécois autant par le Ministère que par les municipalités.

L'utilisation d'un indice de rigueur hivernale, reposant sur des données météorologiques diverses et objectives, permettra au Ministère et aux municipalités de mieux comprendre et d'expliquer l'étendue des ressources opérationnelles engagées en fonction des conditions hivernales de l'année correspondante (par exemple, si plus de matériel a été utilisé, est-ce relié à un hiver plus rude ?). Le Ministère et les municipalités pourront également utiliser ce nouvel indice pour comparer les conditions hivernales des différentes directions territoriales et/ou des différents centres de services, dont l'intensité peut varier d'une année à l'autre. Enfin, cet indice pourrait également servir d'indicateur auprès du grand public et des différents partenaires du Ministère.

Des municipalités ont été invitées à désigner des spécialistes pour participer à titre de membres au comité de suivi du projet. Les bénéfices pour ces municipalités seront du même ordre que ceux pour le Ministère.

Les objectifs principaux du projet de recherche seront de :

- Développer un nouvel indice de rigueur hivernale applicable au territoire québécois, qui permet d'apprécier la rigueur des différents hivers et de donner des résultats spécifiques à différentes localisations (municipalités, régions) en fonction des périodes qui seront jugées les plus adéquates ;
- S'assurer que le calcul de cet indice se fait avec des données météorologiques disponibles, pérennes et de qualité ;
- Valider la corrélation de cet indice avec l'utilisation des ressources opérationnelles (matériaux, matériels, etc.) par les différents

intervenants de la viabilité hivernale (par exemple, si l'indice est élevé, la quantité de ressources utilisées est corrélée).

Les objectifs spécifiques du projet de recherche sont :

- Effectuer une revue de littérature des différents indices de rigueur hivernale existant dans le monde et produire une analyse comparative de ces derniers ;
- Réaliser une revue des données météorologiques et routières pertinentes et disponibles sur le territoire québécois pour les cinq à dix dernières années ;
- Évaluer la qualité des données météorologiques et routières pertinentes et disponibles sur le territoire québécois pour les cinq à dix dernières années ;
- Effectuer des simulations de ces indices sur le territoire québécois avec des données météorologiques et routières québécoises disponibles, tout en comparant et en faisant une analyse des résultats de ces indices (les saisons problématiques connues sont 2007-2008 et 2018-2019 et il faut évaluer s'il est pertinent de les prendre en compte) ;
- Mesurer la corrélation entre ces indices et les données sur les ressources opérationnelles du Ministère (et des municipalités) sur les cinq ou dix dernières années ;
- Adapter ou proposer une nouvelle façon de calculer cet indice en fonction des données disponibles et des spécificités du territoire québécois.

Le projet de recherche consiste à développer une méthode de calcul d'un nouvel indice de rigueur hivernale pour le territoire québécois. Cet indice sera calculé à partir des données météorologiques disponibles. Il permettra de donner des résultats spécifiques à différentes localisations au Québec (municipalités, régions), en fonction des périodes jugées les plus adéquates (mensuelles, annuelles).

Le projet de recherche comporte les étapes suivantes qui répondent aux objectifs cités précédemment. Elles sont décrites dans le présent rapport.

Étape 1 : Effectuer une revue de littérature sur les différents indices de rigueur hivernale à travers le monde, et plus spécifiquement ceux utilisés au Canada et aux États-Unis, en identifiant la façon dont l'indice est calculé, sous quelle base temporelle et avec quelles données. Cette étape est décrite dans la section 2 *Revue de littérature* du présent rapport.

Étape 2 : Collecter, structurer et mettre en forme les données météorologiques et routières sur le territoire québécois pour les cinq à dix dernières années, notamment les données d'Environnement Canada et les données provenant des stations météorologiques du Ministère. Des données météorologiques de municipalités pourront aussi être considérées. Cette étape est décrite dans la section 4 *Données* du présent rapport.

Étape 3 : Collecter, structurer et mettre en forme les données sur les opérations de viabilité hivernale du Ministère et des partenaires municipaux du projet, notamment les quantités de fondant et d'abrasifs utilisés, les heures d'opération, l'affectation du réseau en fonction des données des conditions

routières et toutes autres données jugées pertinentes, sur une base mensuelle (ou moindre) et pour une période couvrant les cinq à dix dernières années. Cette étape est décrite dans la section 4 *Données* du présent rapport.

Étape 4 : Expérimenter le calcul des différents indices recensés à l'aide des données météorologiques afin de les comparer et mesurer le potentiel de corrélation entre ces indices et les données sur les ressources opérationnelles, et ce, dans le but de déterminer les facteurs les plus importants pour la réalité québécoise. Cette étape est décrite dans la section 5 *Résultats* du présent rapport.

Étape 5 : Développer un nouvel indice permettant de maximiser la corrélation entre la rigueur des hivers et les ressources engagées. Proposer une couverture spatiale et temporelle permettant une spécialisation de l'indice de rigueur hivernale en fonction des réalités locales. Cette étape est décrite dans la section 5 *Résultats* du présent rapport.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

Dans ce chapitre, nous présentons différents travaux touchant le développement d'indices de rigueur hivernale. Il est à savoir que nous avons restreint nos recherches aux indices développés dans le but d'évaluer l'entretien hivernal des routes. Nous abordons d'abord l'historique, puis présentons divers indices développés à travers le monde.

2.1 Les indices de rigueur hivernale : historique

Cette section débute par les travaux américains, qui sont les plus répertoriés dans la littérature, puis nous regardons ensuite les indices canadiens et d'ailleurs.

2.1.1 États-Unis

Les conditions météorologiques froides et défavorables, telles que la neige, la glace et le verglas, menacent le transport à l'échelle étatique et a un impact sur l'entretien des routes, la sécurité et la mobilité (Pisano et al., 2008 ; Road Weather Management Program (RWMP), 2016). Ainsi, entre 2005 et 2014 aux États-Unis, 22 % des accidents de véhicules étaient liés aux conditions météorologiques (1 258 978 accidents). L'*United States Department of Transportation* (USDOT) et la *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA) ont estimé que le coût économique et sociétal des accidents de la route ayant survécu en 2010 aux États-Unis était de 836 milliards de dollars américains, dont 180 milliards étaient liés spécifiquement aux conditions météorologiques (Blincoe et al., 2015 ; NHTSA, 2016).

La neige, la glace et le verglas impliquent une diminution de l'adhérence des chaussées, qui entraînent une circulation des véhicules à des vitesses plus lentes, réduisant la capacité des axes et augmentant les risques d'accidents. Ainsi, sur une chaussée enneigée ou boueuse, la vitesse de circulation des véhicules peut diminuer jusqu'à 40 % (RWMP, 2016). Ces réductions de capacité des voies augmentent les retards sur les temps de trajet, tout en augmentant les coûts d'entretien des routes.

L'entretien hivernal représente 20 % du budget d'entretien total des ministères des transports des états américains. Chaque année, ce sont 2,3 milliards de dollars américains qui sont dépensés par les différentes agences d'état ou fédérales pour les opérations de déneigement et de déglacage, additionnés à des millions de dollars US pour réparer les infrastructures endommagées par la neige et la glace (Federal Highway Administration (FHWA), 2016).

Il paraît donc important d'atténuer les phénomènes météorologiques froids et défavorables tels que les tempêtes de neige, en allouant les ressources requises permettant de réduire leur sévérité. Les ministères de transport des états américains sont donc mandatés pour mener des opérations de viabilité hivernale. Plusieurs études ont été menées à différentes échelles – étatique ou fédérale – afin d'identifier les meilleures pratiques permettant d'améliorer l'efficacité et de réduire les coûts des opérations d'entretien hivernal (Fay et al., 2013).

Deux grandes études menées par le *Strategic Highway Research Program* (SHRP) et la revue internationale des technologies d'entretien

hivernal ont conduit à des avancées innovantes dans le domaine des opérations de viabilité hivernale en Amérique du Nord (Boselly et al., 1993). Aussi, de nouvelles pratiques de contrôle de la neige et de la glace ont été introduites à la suite d'une étude menée par le *National Cooperative Highway Research Program* (NCHRP) (Conger, 2005). Selon ces études, les organismes de transport doivent effectuer un certain nombre de tâches associées aux opérations d'entretien hivernal, telles que le déneigement des axes routiers et des rampes d'accès et le déblaiement des amas de neige. Ces tâches doivent être constamment priorisées en fonction du moment de la journée et de l'importance du trafic routier. Aussi, il est rapporté que l'utilisation de ressources et d'équipements spécifiques permet d'effectuer ces opérations de viabilité hivernale (Fay et al., 2013). Ce seront ensuite les conditions météorologiques et routières qui détermineront le type de matériau à utiliser et la façon de l'appliquer (Blackburn et al., 2004).

L'évaluation des performances des opérations de viabilité hivernale nécessite de prendre en ces conditions météorologiques et routières. Cependant, la mise en œuvre de ces évaluations est complexe, car les conditions météorologiques peuvent être très variables d'un jour ou d'une année à l'autre. Ainsi, la première étape essentielle permettant d'évaluer les performances des opérations de viabilité hivernale est d'évaluer la sévérité saisonnière hivernale, à l'aide d'un indice de rigueur hivernale.

De nombreuses études (Boustead et al., 2015 ; Farr et Sturges, 2012 ; Marquis et al., 2009 ; McCullouch et al., 2004 ; Nixon et Qiu, 2005 ; Strong et al., 2005 ; Walker et al., 2019a) ont développé le concept d'indice de rigueur hivernale aux États-Unis. Au total, ce sont ainsi au moins 19 des 50 états américains qui ont documenté l'utilisation d'un indice de rigueur hivernale (Walker et al., 2019b).

2.1.2 Canada

Au Canada, le concept d'indice de rigueur hivernale est introduit en 2001 (Andrey et al., 2001). Cependant, les résultats ont montré une certaine instabilité, car les niveaux de performance n'étaient pas identiques entre les villes expérimentées. Il faudra attendre 2006 pour qu'un indice présentant des résultats plus fiables soit développé à l'échelle fédérale (Suggett, 2006).

Puis, en 2012, un indice de rigueur hivernale simple à calculer et utilisant des données disponibles à travers tout le Canada est développé (Andrey et Matthews, 2012). Présentant des résultats convaincants, cet indice a notamment servi de base à l'élaboration de l'indice québécois de 2014, que nous aborderont à la suite de ce rapport.

Enfin, en 2016, un indice présentant des résultats très satisfaisants est développé à l'échelle ontarienne (Matthews et al., 2017). Il s'appuie notamment sur l'indice précédemment développé par Andrey et Matthews en 2012. Cet indice de 2016 est celui ayant été développé le plus récemment au Canada et étant le plus proche géographiquement du Québec – hors l'indice ayant été spécifiquement développé pour le MTMD en 2014.

2.1.3 Québec

Le développement d'un indice de rigueur hivernale québécois est documenté par l'association mondiale de la route (PIARC) depuis 2006 (PIARC, 2006, 2010, 2014).

En 2013, le MTMD a chargé l'INRS de développer, appliquer, évaluer et documenter un indice de rigueur hivernale (Hammami et al., 2014). L'objectif était de permettre au Ministère d'évaluer la performance de l'une des opérations d'entretien hivernal, qui est l'utilisation du sel de déglacage. L'indice développé intégrait donc les variables climatiques affectant les opérations d'entretien hivernal, en se concentrant sur l'application du sel de déglacage.

Comme évoqué précédemment, cet indice a été développé en appliquant la méthode d'Andrey et Matthews (2012) aux données climatiques québécoises. Un certain nombre de variables y sont utilisées, telles que la température (température maximale, minimale et moyenne), la pluie (pluie totale journalière et nombre d'heures de tombée de pluie verglaçante par jour), la neige (neige totale journalière et nombre d'heures de tombée de neige par jour), les précipitations (précipitations totales journalières), le point de rosé (point de rosé minimal par jour) et le vent (vitesse moyenne du vent).

Bien que les données liées aux opérations hivernales du MTMD étaient utilisées, ce sont les données météorologiques d'Environnement Canada qui permettaient le calcul de cet indice, dont notamment celles liés spécifiquement aux précipitations de neige d'une part, et de pluie de l'autre. Cependant, ces données sont indisponibles depuis plusieurs années. En effet, Environnement Canada ne calcule maintenant plus que les précipitations totales, sans faire de distinction entre neige et pluie. L'indice développé par l'INRS en 2014 est donc aujourd'hui inutilisable tel quel.

Il est à savoir que cet indice a été uniquement corrélé avec les données de consommation de sel de déglacage du MTMD. Ainsi, pour chaque direction générale territoriale, la totalité de la consommation de sel par saison hivernale, entre 2008 et 2011, a été divisée par la longueur pondérée des circuits de déneigement.

De plus, malgré le fait que le rapport de l'INRS énumère une dizaine d'indices de rigueur hivernale au sein de sa revue de littérature, aucune expérimentation de ces indices n'a été effectuée. En effet, comme mentionné précédemment, uniquement une formule basée sur la méthode d'Andrey et Matthews de 2012 a été proposée.

Le nouvel indice de rigueur hivernale développé au sein du présent rapport se démarquera donc de celui développé par l'INRS en plusieurs points. Tout d'abord, il viendra corriger la problématique liée à l'indisponibilité des données de neige et de pluie d'Environnement Canada, en proposant un calcul intégrant les précipitations totales. Puis, il aura une forte corrélation avec différentes opérations de viabilité hivernale du Ministère (nombre d'opérations, durée totale des opérations, quantité totale de sel épandue, somme des quantités totales de sel et d'abrasifs épandues). Enfin, au sein du présent rapport, plusieurs des indices recensés dans la littérature seront expérimentés, ce qui permettra de sélectionner adéquatement le ou les indices ayant la

meilleure corrélation possible avec ces opérations de viabilité hivernale. On peut également noter le fait que les données récoltées seront plus récentes que celles recueillies par l'INRS, et proviendront probablement de capteurs présentant une meilleure fiabilité qu'entre 2008 et 2011.

2.1.4 Ailleurs dans le monde

À l'échelle internationale, le premier indice à avoir été développé est l'indice de Hulme, qui a été testé en Angleterre en 1982 (Hulme, 1982). Il est par ailleurs considéré comme l'indice ayant été le plus utilisé par les organisations internationales. S'en est ensuite suivi l'indice développé en 1985 par Paczos en Pologne (Paczos, 1985).

Puis, en 1988 a été développé et testé l'indice COST 309 en utilisant les données météorologiques du Danemark, qui a également servi de base à l'élaboration de l'indice GAB en Suède (Voldbord et Knudsen, 1988 ; Gustavsson, 1996).

Toujours en Scandinavie, un indice de rigueur hivernale spécifique aux conditions météorologiques norvégiennes a été développé en 1999, puis testé en 2001 (Mahle et Rogstad, 2002). De son côté, la Finlande a développé un tel indice en 2001, en se basant uniquement sur la température (Venalainen, 2001).

2.2 Les indices et leurs variables

Tel qu'évoqué précédemment, les indices de rigueur hivernale ont pour but d'évaluer les performances des opérations de viabilité hivernale d'un territoire, que ce soit pour des raisons économiques ou opérationnelles. Chaque territoire va ensuite élaborer cet indice selon son contexte météorologique et routier, afin de le mettre en lien avec la ou les opérations de viabilité hivernale qu'il souhaite évaluer (déneigement, déglçage, patrouille, soufflage, transport de neige). Ainsi, par exemple, la valeur de l'indice de rigueur hivernal sur une saison va être mise en parallèle avec les dépenses totales en viabilité hivernale saisonnières, afin d'évaluer si les opérations ont été efficaces, et d'effectuer des ajustements au besoin (formation du personnel, choix des produits et des équipements, etc.).

Le tableau suivant énumère les indices de rigueur hivernale rencontrés au sein de la littérature, ainsi que les principales variables météorologiques et bases temporelles qu'ils utilisent. Plusieurs de ces indices seront utilisés pour notre analyse conduisant au développement d'un indice québécois, ils sont marqués d'un astérisque dans ce tableau. Le calcul de ces indices sélectionnés sera donc explicité plus loin.

Tableau 1: Indices de rigueur hivernale recensés au sein de la littérature

Indice	Référence	Variable utilisée					Base temporelle		
		Température		Neige	Pluie	Vent	Jour	Mois	Saison
		Air	Surface						
Fédéral É.-U. (SHRP) *	Walker et al., 2019b	X		X			X	X	
Californie	Walker et al., 2019b	X		X			X		
Colorado	Walker et al., 2019b		X	X		X	Évènement hivernal		
Idaho	Walker et al., 2019b		X	X		X	Évènement hivernal		
Illinois *	Walker et al., 2019b	X		X			X	X	
Indiana	Walker et al., 2019b	X		X	X			X	
Iowa	Walker et al., 2019b		X	X	X	X	Évènement hivernal		
Maine	Marquis et al., 2009	X		X	X		X		
Minnesota	Walker et al., 2019b			X	X			X	
Montana	Walker et al., 2019b	X		X		X			
Oregon	Walker et al., 2019b	X		X			X		
Pennsylvanie *	Walker et al., 2019b	X		X			X	X	
Wisconsin	Walker et al., 2019b			X	X			X	
Ontario *	Matthews et al., 2017	X		X	X	X			
Québec (INRS) *	Hammami et al., 2014	X		X	X	X		X	
Angleterre (Hulme)	Hulme, 1982	X		X				X	
Danemark (COST 309)	Voldborg et Knudsen, 1988		X	X			X		
Finlande	Venalainen, 2001	X						X	
Norvège (NORIKS)	Mahle et Rogstad, 2002	X		X	X	X	X	X	
Pologne *	Szyga-Pluta, 2022	X						X	
Suède (GAB)	Gustavsson, 2007		X	X			X		

Il a été remarqué à travers la littérature que quatre variables météorologiques sont communément utilisées au sein de la majorité des indices de rigueur hivernale : la température, la neige, la pluie et le vent. De plus, il est constaté que c'est la disponibilité des données météorologiques, qui peuvent être continues ou catégorielles, qui a tendance à dicter l'élaboration des indices. (Walker et al., 2019b)

Ces indices de rigueur hivernale peuvent être calculés selon différentes bases temporelles : au jour, au mois ou à la saison hivernale. Aussi, certains états américains, tels que le Colorado, l'Idaho et l'Iowa, proposent un indice de

rigueur prenant uniquement en considération les événements hivernaux extrêmes, tels que les tempêtes de neige. En effet, il est considéré que sur une saison, la majorité des besoins d'opérations de viabilité hivernale répondent uniquement à ces événements extrêmes, et qu'à contrario, peu d'opérations sont nécessaires hors tempête. Ces indices prendront alors en compte des facteurs tels que les conditions avant et après la tempête, la température de surface, la vitesse du vent et le type de précipitation. (Walker et al., 2019b)

2.2.1 Température

La température est la variable météorologique la plus utilisée au sein de la littérature traitant d'indices de rigueur hivernale, tout comme la neige. Ainsi, parmi les 21 indices recensés au sein du présent rapport, 19 d'entre-eux prennent la température en compte dans leur calcul, ce qui représente 90% des indices.

Elle est exprimée en degré Celsius (°C) ou en degré Fahrenheit (°F) et présente des sous variantes, telles que :

- La température moyenne, utilisée par 10 indices sur les 19 prenant en compte la température dans leur calcul (10/19) ;
- La température minimale (8/19) ;
- La température maximale (9/19) ;
- La température du point de rosée (aussi appelée point de rosée) (5/19).

La température peut être exprimée sur une période donnée, ou à un instant T.

2.2.1.1 Distinction entre la température de l'air et la température de surface

Il est important de distinguer la température de l'air de la température de surface.

Ainsi, parmi les 19 indices utilisant la température comme variable météorologique, 14 d'entre eux réfèrent à la température de l'air (14/19), contre 5 pour la température de surface (5/19).

Mise en garde : Dans la suite du document, puisque les six indices sélectionnés pour l'expérimentation utilisent tous la température de l'air, lorsque la température sera mentionnée, celle-ci fera allusion à la température de l'air, à moins de l'ajout du terme « de surface ». Ce choix de conserver la température de l'air plutôt que celle de la surface est également adapté aux données à disposition car au niveau des stations, les températures de l'air sont généralement fonctionnelles et validées presque 100% du temps. À contrario, les capteurs de chaussée ne représentent qu'un point sur la route, et le taux de bris de ceux-ci est plus élevé, donc la disponibilité de cette donnée de surface est plus problématique.

2.2.2 Neige

La neige est, tout comme la température, la variable météorologique la plus répertoriée au sein de la littérature. On dénombre donc également 19 indices sur 21 la prenant en compte dans leur calcul, représentant 90% des indices.

Elle est exprimée en millimètres (mm), centimètres (cm) ou pouces (\" ou in) et présente des sous variantes, telles que :

- La neige totale tombée sur une période donnée (13/19) ;
- La hauteur de neige à un instant T (4/19) ;
- Le nombre d'heures (h) dans lesquelles un évènement de tombée de neige a été observé (4/19) ;
- Le nombre de fois où un évènement de tombée de neige a été observé, (9/19).

La neige peut également être associée à d'autres variables. Par exemple, on parle de poudrerie au sein de certains indices lorsque des évènements de neige et de vent ont lieu au même moment.

2.2.3 Pluie

Au sein de la littérature, on note que sur les 21 indices de rigueur hivernale, 8 d'entre eux prennent en considération la pluie comme variable, ce qui représente 38% des indices.

Elle est exprimée en millimètres (mm), centimètres (cm) ou pouces (" ou in) et présente des sous variantes :

- La pluie tombée sur une période donnée (5/8) ;
- La hauteur d'eau ou de glace à un instant T (2/8) ;
- Le nombre d'heures (h) dans lesquelles un évènement de pluie verglaçante a été observé (2/8) ;
- Le nombre de fois qu'un évènement de pluie verglaçante a été observé (3/8).

2.2.4 Vent

Sur les 21 indices de rigueur hivernale recensés au sein du présent rapport, 7 d'entre eux considèrent le vent dans leur calcul, ce qui représente 33% des indices.

Cette variable est exprimée en kilomètres par heure (km/h) ou miles par heure (mph) et présente des sous variantes :

- La vitesse moyenne du vent sur une période donnée (4/7) ;
- La vitesse maximale du vent sur une période donnée (3/7).

2.2.5 Autres variables

D'autres variables ont également été rencontrées au sein de certains indices, telles que :

- La nombre d'heures (h) d'ensoleillement sur une période donnée ;
- La durée (h) d'une tempête ;
- La nombre de tempêtes sur une période donnée.

On rencontre également des variables catégorielles au sein de la littérature, tel que le type de tempête (1 : pluie verglaçante; 2 : neige légère; 3 : neige moyenne; 4 : neige épaisse).

3 MÉTHODOLOGIE

Au cours de ce projet, l'équipe de recherche a suivi les étapes spécifiées au sein du contrat de recherche, qui sont d'effectuer une revue de littérature (1), de compiler et de structurer les données météorologiques et routières (2), ainsi que les données sur les opérations de viabilité hivernale (3), d'expérimenter les indices et de mesurer leur potentiel de corrélation (4), et enfin de développer un nouvel indice de rigueur hivernale pour le Québec (5).

Ces cinq étapes sont décrites successivement au sein des différentes sections du présent rapport.

3.1 Revue de littérature

Dans le but d'obtenir un historique et un échantillon des indices de rigueur hivernale existant à travers le monde, et plus spécifiquement au Canada et aux États-Unis, une revue de littérature a été effectuée. Celle-ci, qui constitue la première étape du projet, est présentée dans la section 2 *Revue de littérature* du rapport.

Afin d'effectuer cette revue, l'équipe de recherche s'est appuyée sur des outils tels que les accès de Polytechnique Montréal aux bases de données scientifiques et l'outil de recherche universitaire Google Scholar. De plus, l'équipe s'est déplacée au centre de documentation du ministère des Transports et de la Mobilité durable (MTMD), à Montréal, afin d'approfondir l'historique québécois des indices de rigueur hivernale.

3.2 Compilation et structuration des données

Les seconde et troisième étapes du projet ont été de collecter, évaluer, compiler et structurer différentes sources de données, pour pouvoir appliquer les calculs d'indices à des données opérationnelles concrètes.

Le détail de cette démarche est exposé dans la partie 4 *Données* de ce rapport.

D'une part, des données météorologiques et routières de neuf stations, des données de conditions routières, ainsi que des données opérationnelles nous ont été transmises par le MTMD, pour un intervalle de temps de 4 à 5 ans selon le type de données. D'autre part, des données météorologiques d'Environnement Canada ont été récupérées en ligne pour les stations météorologiques les plus proches -et fournissant des informations suffisamment complètes- des stations du MTMD. À partir de là, puisque l'échelle temporelle des données du MTMD est aux dix minutes tandis que celle des données d'Environnement Canada est à la journée, un traitement statistique a été nécessaire pour permettre de fusionner ces deux sources. Une structuration cohérente a également été mise en place pour obtenir des fichiers exploitables. Le logiciel R a été utilisé pour ces manipulations.

Ainsi, des fichiers consolidés sont obtenus, par mois et par station, regroupant les données pertinentes provenant de chacune des deux sources : le MTMD et Environnement Canada. Ces fichiers deviennent les supports pour les étapes 4 et 5 du projet.

Enfin, les données sur les opérations de viabilité hivernale (nombre d'opérations, durée totale des opérations, quantité totale de sel épandue, somme des quantités totales de sel et d'abrasifs épandues) seront utilisées pour venir optimiser les indices développés au sein du projet.

3.3 Expérimentation des indices et potentiels de corrélation

En utilisant les fichiers de données consolidés précédemment créés, différents indices de la littérature ont été testés et appliqués numériquement dans le contexte de la présente étude. Le logiciel R a été utilisé afin de calculer les indices et de produire les graphiques permettant de les comparer entre eux.

Une réflexion a ensuite été portée sur la corrélation entre la valeur de ces indices et les données d'opérations de viabilité hivernale du Ministère. Cet exercice a permis de déterminer à quel point ces variables sont dépendantes et d'évaluer quels indices semblent les plus adaptés au contexte québécois.

Ces résultats et interprétations sont présentés en partie 5.

3.4 Développement d'un nouvel indice de rigueur hivernale

En se basant sur tout ce qui a été construit jusqu'alors, le but final de l'étude a été de mettre au point des indices de rigueur hivernale propres au présent contexte du Québec. Deux indices ont été créés : l'un se basant uniquement sur la température, et l'autre se basant sur plusieurs catégories d'événements météorologiques. L'approche choisie a été de s'appuyer sur l'indice de la Pologne pour construire l'indice basé uniquement sur la température (IBUT), et sur l'indice de l'Ontario pour construire l'indice basé sur des catégories d'événements météorologiques (ICEM).

Ces indices ont une structure stable pour permettre une généralisation et une utilisation globale et simple par les différents acteurs québécois, selon les types de données météorologiques auxquelles ils ont accès.

En guise d'exemple de cette application potentielle et de validation, ces indices nouvellement développés ont été appliqués à des données municipales exogènes : celles de la ville de Pointe-Claire.

Les développements correspondants sont présentés dans la partie 5.

4 DONNÉES

Dans le cadre de ce projet, plusieurs sources de données ont été utilisées. Certaines ont été fournies par le Ministère des Transports et de la Mobilité Durable du Québec (MTMD), d'autres ont été récupérées depuis le site web d'Environnement Canada, organe du gouvernement du Canada.

4.1 Données du MTMD et des municipalités

Les données reçues couvrent trois catégories : les conditions météorologiques, les conditions routières et les opérations de maintenance hivernale du réseau routier.

4.1.1 Dates de réception des différentes données

Les sources de données ont été transmises selon la chronologie suivante :

Tableau 2: Historique de réception des différentes sources de données du MTMD

Fichier	Date de transmission
Données météorologiques et routières de quatre stations : SMRF-15, SMRF-19, SMRF-34 et SMRF-37, avec leur documentation, pour les mois de janvier 2020 et février 2022	30 septembre 2022
Données d'opérations hivernales, pour la saison 2021-2022	19 octobre 2022
Données des conditions routières, de 2017 à 2022, avec leur documentation	20 octobre 2022
Visite du centre de documentation du MTMD à Montréal	6 décembre 2022
Rapport sur l'indice québécois de rigueur hivernale développé par l'INRS en 2014	8 décembre 2022
Données météorologiques et routières de cinq stations : SMRF-15, SMRF-19, SMRF-34, SMRF-37 et SMRF-42, pour tous les mois de janvier 2018 à décembre 2022	19 janvier 2023
Données météorologiques de la ville de Pointe-Claire	3 mars 2023
Données d'opérations hivernales, pour les saisons 2018-2019, 2019-2020, 2020-2021	15 mars 2023
Données opérationnelles de la ville de Pointe-Claire	19 avril 2023

Fichier	Date de transmission
Données météorologiques et routières de trois stations : SMRF-07, SMRF-20, SMRF-42, pour tous les mois de janvier 2018 à décembre 2022	21 avril 2023
Données météorologiques et routières de trois stations : SMRF-18, SMRF-23, SMRF-24, pour tous les mois de janvier 2018 à décembre 2022	25 avril 2023
Données météorologiques et routières de la station SMRF-26, pour tous les mois de janvier 2018 à décembre 2022	18 août 2023

4.1.2 Données météorologiques et routières

Le MTMD a fourni à l'équipe de recherche les données météorologiques et routières associées à neuf stations réparties au sein du Québec (Abitibi-Témiscamingue, Chaudière-Appalaches, Côte-Nord, Estrie, Gaspésie, Laurentides, Montérégie, Outaouais, Saguenay-Lac-St-Jean). Ces stations sont respectivement nommées SMRF-15 (Saint-Vallier), SMRF-18 (Chelsea), SMRF-20 (Rouyn-Noranda), SMRF-23 (Sainte-Thérèse), SMRF-24 (Saint-Jean-sur-Richelieu), SMRF-26 (Stanstead), SMRF-34 (Gaspé), et SMRF-37 (Manic-5) et SMRF-42 (Saguenay). Le Ministère détient au total 53 stations météorologiques dont les données peuvent être partagées.

L'échelle de temps de ces données est aux dix minutes.

Chacune des stations possède plusieurs capteurs météorologiques et routiers, et chacun d'eux produit un fichier de données mensuelles. Chaque capteur mesure un certain nombre de caractéristiques au cours du temps, toutes les dix minutes. Une partie d'entre eux se retrouve dans la totalité des stations. C'est le cas des capteurs CS105_10, HMP45C10, MMRTS et Wind1_10. Les variables respectivement mesurées par ces quatre capteurs sont répertoriées dans le tableau 3 ci-dessous. Dans ce tableau et dans les suivants, le type des variables peut être numérique (« Num »), catégoriel (« Cat ») ou date/heure (« Datetime »).

Tableau 3: Description des variables mesurées par les quatre capteurs communs à toutes les stations

Variable	Unité	Type	Source
		(Num ou Cat)	(Nom du capteur)
Pression atmosphérique	hPa	Num	CS105_10
Température atmosphérique	°C	Num	HMP45C10
Point de rosée	°C	Num	HMP45C10
Humidité relative	%	Num	HMP45C10
Température maximale	°C	Num	HMP45C10

Variable	Unité	Type	Source
		(Num ou Cat)	(Nom du capteur)
Température minimale	°C	Num	HMP45C10
Température lorsque l'humidité relative est maximale	°C	Num	HMP45C10
Point de rosée lorsque la température est maximale	°C	Num	HMP45C10
Point de rosée lorsque la température est minimale	°C	Num	HMP45C10
Point de rosée lorsque l'humidité relative est maximale	°C	Num	HMP45C10
Humidité relative maximale	%	Num	HMP45C10
Humidité relative lorsque la température est maximale	%	Num	HMP45C10
Humidité relative lorsque la température est minimale	%	Num	HMP45C10
Moyenne de la température de surface de la route	°C	Num	MMRTS
Direction vectorielle moyenne du vent	deg	Num	Wind1_10
Écart-type moyen de la direction du vent	deg	Num	Wind1_10
Vitesse scalaire moyenne du vent	km/h	Num	Wind1_10
Vitesse vectorielle moyenne du vent	km/h	Num	Wind1_10
Direction scalaire moyenne du vent	deg	Num	Wind1_10
Direction du vent à la fin de l'intervalle de mesure	deg	Num	Wind1_10
Direction du vent au moment où il est maximum dans l'intervalle de mesure	deg	Num	Wind1_10
Vitesse du vent à la fin de l'intervalle de mesure	km/h	Num	Wind1_10
Vitesse maximale du vent dans l'intervalle de mesure	km/h	Num	Wind1_10

Certains capteurs additionnels sont quant à eux disponibles ou non selon les stations, mais sont néanmoins associés à des grandeurs mesurées similaires.

- IRS31 (SMRF-37, SMRF-42), IRS32 (SMRF-15), LufData1 (SMRF-18, SMRF-23, SMRF-24, SMRF-26, SMRF-34, SMRF-37, SMRF-42) et LufData2 (SMRF-20) mesurent notamment :

Tableau 4: Description des principales variables mesurées par les capteurs additionnels

Variable	Unité	Type
		(Num ou Cat)
Température de la surface de la route	°C	Num
Température de la route à -5 cm	°C	Num
Température de la route à -40 cm	°C	Num
Code d'état de la surface de la route		Cat

- Enfin, TGEL3M_1, TP101_3M, SPGEL ou encore SONDEGEL14 mesurent :
 - Toutes les températures sous la chaussée à l'aide de multiples thermistances, respectivement au nombre de 18, 18, 25 et 20, réparties à des profondeurs différentes

Malgré ces nombreuses données de précision mises à disposition ici, certaines données importantes pour l'étude ne sont pas disponibles, notamment les précipitations de neige et de pluie. Ces variables de précipitations étant très présentes dans la littérature des indices de rigueur hivernale, une autre source de données va être utilisée pour les obtenir : celle d'Environnement Canada, présentée en partie 4.2.

Cette étude sera donc basée sur les données du MTMD, associées à celle d'Environnement Canada.

4.1.3 Données sur les conditions routières

Des données complémentaires sur les conditions routières, de 2017 à 2022, ont également été fournies par le MTMD.

Un fichier de définition du répertoire de segments, pour chaque saison hivernale allant de 2017/2018 à 2021/2022, est présent. Des informations géographiques et administratives y sont recensées pour chacun des segments.

De plus, un fichier de données de conditions routières, pour ces segments ainsi définis, est présenté pour chacune des saisons. Voici la structure de ces fichiers :

Tableau 5: Champs des fichiers de données de conditions routières

Nom de la variable	Type	Description	Valeurs possibles
Numéro segment	Num	Numéro du segment utilisé pour décrire la condition	
Unités administratives	Num	Unité où se trouve le segment	
Transmis par app. mobile ?	Cat	Indique si la donnée a été entrée via l'application mobile	*N *O
Date condition routière	Datetime	Date et heure de la mesure	
Numéro route début	Num	Numéro de la route de début	
Chaussée	Cat	État de la chaussée du segment	*Couverte de nei. dur *Dégagée et mouillée *Dégagée et sèche *Enneigée *Glacée *Part. couv. nei. dur *Part. enneigée *Part. glacée
Visibilité	Cat	État de la visibilité	*Bonne *Nulle *Réduite
Indicateur lames de neige	Cat	Présence ou non de lames de neige	*Non *Oui

Parmi ces données, l'unique ayant été utilisée au cours de cette étude est celle sur l'état de la chaussée. Cependant, celle-ci étant également disponible au sein des données météorologiques du Ministère, ces données sur les conditions routières n'ont donc pas été utilisées.

4.1.4 Données sur les opérations de viabilité hivernale

Enfin, des données sur les opérations de viabilité hivernale sont mises à disposition.

Ces données, reliées à l'entretien routier, vont permettre l'optimisation de la corrélation entre les activités opérationnelles et les futurs indices mis au point.

Les données fournies couvrent les opérations des quatre saisons allant de 2018-2019 à 2021-2022, pour chaque DG parmi les suivantes : région métropolitaine de Montréal, Gaspésie – Îles-de-la-Madeleine, Bas-Saint-Laurent, Centre-du-Québec, Chaudière-Appalaches, Côte-Nord, Saguenay - Lac-Saint-Jean - Chibougamau, Mauricie, Capitale-Nationale, Montérégie, Abitibi-Témiscamingue, Laurentides-Lanaudière, Outaouais et Estrie.

Des informations y sont données sur les entités géographiques et administratives concernées, la date d'intervention, l'exécuteur (régie, contrat ou régie sur circuit à contrat), le véhicule utilisé, la période, les heures, la

durée de l'opération, la distance de l'opération, le type de lecture (balance ou contrôle électronique), le type de mesure (masse ou volume), la méthode (à bord des camions ou lors de la mise en pile), l'application aux points critiques, le type d'abrasif, le type de saumure, ainsi que sur toutes les quantités utilisées de sel et d'abrasifs (en tonnes), de saumure (en litres), de même que sur les propriétés des mélanges correspondants.

Sept opérations distinctes de viabilité hivernale y sont répertoriées :

- Déglçage ;
- Déglçage mécanique ;
- Dénéigement ;
- Dénéigement / Déglçage ;
- Patrouille ;
- Soufflage de neige ;
- Transport de neige.

4.2 Données d'Environnement Canada

4.2.1 Présentation des données

Comme vu précédemment, certaines informations nécessaires à l'application des indices sont manquantes dans les données du MTMD, dont notamment les précipitations. De plus, il serait intéressant de confronter les valeurs obtenues via le MTMD avec une source externe de données, pour confirmer leur cohérence.

C'est pourquoi il est choisi de se servir des données météorologiques en libre-service fournies par le gouvernement du Canada, par l'intermédiaire du site internet d'Environnement Canada.

Un grand nombre de stations météorologiques d'Environnement Canada sont réparties à travers le Québec. Puisqu'une partie d'entre elles ne sont plus actives, il est décidé de ne s'intéresser qu'à celles qui sont encore en fonctionnement. Deux échelles temporelles sont utilisées par Environnement Canada : les données par heure et les données par jour.

4.2.1.1 Données horaires

Dans un premier temps, les données par heure sont considérées.

Les variables exploitables fournies de ces dernières sont répertoriées dans le tableau 6 ci-dessous :

Tableau 6: Description des variables incluses dans les données horaires d'Environnement Canada

Variable	Unité	Type
		(Num ou Cat)
Coordonnées géographiques de la station	Lon/Lat	Num
Heure	/	/
Température atmosphérique	°C	Num
Point de rosée	°C	Num
Humidité relative	%	Num
Précipitations totales horaires	mm	Num
Direction du vent	10s deg	Num
Vitesse du vent	km/h	Num
Pression atmosphérique	kPa	Num
Humidex	°C	Num
Refroidissement éolien	°C	Num

D'après Environnement Canada, les définitions de l'humidex et du refroidissement éolien sont les suivantes : l'humidex est un indice caractérisant le degré de chaleur et d'humidité ressentie par un individu moyen, tandis que le refroidissement éolien est un indice caractérisant la sensation de froid ressentie par un individu moyen. Le premier combine les valeurs de la température et de l'humidité pour donner un nombre représentant la température ressentie, le second combine les valeurs de la température et de la vitesse du vent dans le même objectif.

Dans ce format de données, la répartition des précipitations selon la distinction pluie/neige n'est pas disponible. Cela est problématique car beaucoup d'indices de la littérature s'appuient sur les précipitations exclusives de neige. De plus, une grande partie de ces indices utilise la journée comme échelle temporelle de calcul. Or, il se trouve qu'Environnement Canada fournit également des données à l'échelle de la journée : ce sont donc ces dernières qui sont choisies pour poursuivre l'étude.

4.2.1.2 Données quotidiennes

Les données à l'échelle quotidienne seront donc préférentiellement utilisées dans la suite du projet.

Cette fois, les variables exploitables fournies sont les suivantes :

Tableau 7: Description des variables incluses dans les données quotidiennes d'Environnement Canada

Variable	Unité	Type
		(Num ou Cat)
Jour	/	/
Température maximale	°C	Num
Température minimale	°C	Num
Température moyenne	°C	Num
Degrés-jour de chauffage	°C	Num
Degrés-jour de refroidissement	°C	Num
Quantité totale de pluie	mm	Num
Quantité totale de neige	cm	Num
Quantité totale de précipitations	mm	Num
Épaisseur de neige au sol	cm	Num
Direction de la rafale de vent maximale	10s deg	Num
Vitesse de la rafale de vent maximale	km/h	Num

Les degrés-jour de chauffage et les degrés-jour de refroidissement sont définis par Environnement Canada comme la différence entre la température moyenne quotidienne mesurée et la température moyenne quotidienne de 18°C. Par exemple, si la température moyenne d'un jour donné est de 15°C, cela correspond à 3 degrés-jour de chauffage (18-15) et 3 degrés-jour de refroidissement. À l'inverse, si la température moyenne d'un jour donné est de 21°C, cela correspond à 3 degrés-jour de refroidissement (21-18) et 0 degré-jour de chauffage. Ces grandeurs sont principalement utilisées pour estimer les besoins en chauffage des bâtiments, et les besoins en climatisation des bâtiments, respectivement.

D'après leur structure, ces données devraient présenter une distinction entre les précipitations de neige et les précipitations de pluie. Cependant, bien qu'elles aient été disponibles par le passé, les valeurs de ces champs ne sont plus fournies dans les données récentes. Puisque la distinction pluie/neige est très récurrente dans la littérature, une méthode est utilisée pour l'obtenir, à partir des valeurs de quantités totales de précipitations.

Trois cas sont distingués :

- 1) Si la température minimale quotidienne est strictement positive : la quantité totale de pluie (en millimètres) équivaut à la quantité totale de précipitations (en millimètres), et la quantité totale de neige est nulle.
- 2) Si la température maximale quotidienne est strictement négative : la quantité totale de pluie (en millimètres) est nulle, et la quantité totale de neige (en centimètres) équivaut à la quantité totale de précipitations (en millimètres). Un facteur dix est utilisé pour traduire le changement d'état, c'est-à-dire qu'un millimètre de précipitations correspond à un centimètre de neige.
- 3) Si la température minimale quotidienne est strictement négative et la température maximale quotidienne est strictement positive : une pondération par rapport à ces températures est faite pour obtenir la division en pluie et neige. Par exemple, si la température minimale est de -2°C, la température maximale est de 8°C, et la quantité totale de

précipitations est de 10 millimètres : alors cela donne 8 millimètres de pluie et 2 centimètres de neige.

4.2.2 Sélection des stations météorologiques adaptées

L'objectif étant de fusionner les données du MTMD avec celles d'Environnement Canada, il est nécessaire d'identifier les stations météorologiques d'Environnement Canada correspondantes, les plus proches, pour chacune des stations du MTMD.

Cependant, dans un certain nombre de cas, la station d'Environnement Canada la plus proche de celle fournie par le MTMD présente des données incomplètes (champs manquants, fin d'activité de la station, etc.). Un compromis entre la station la plus proche, la complétude des données et le caractère récent de ces dernières est alors privilégié.

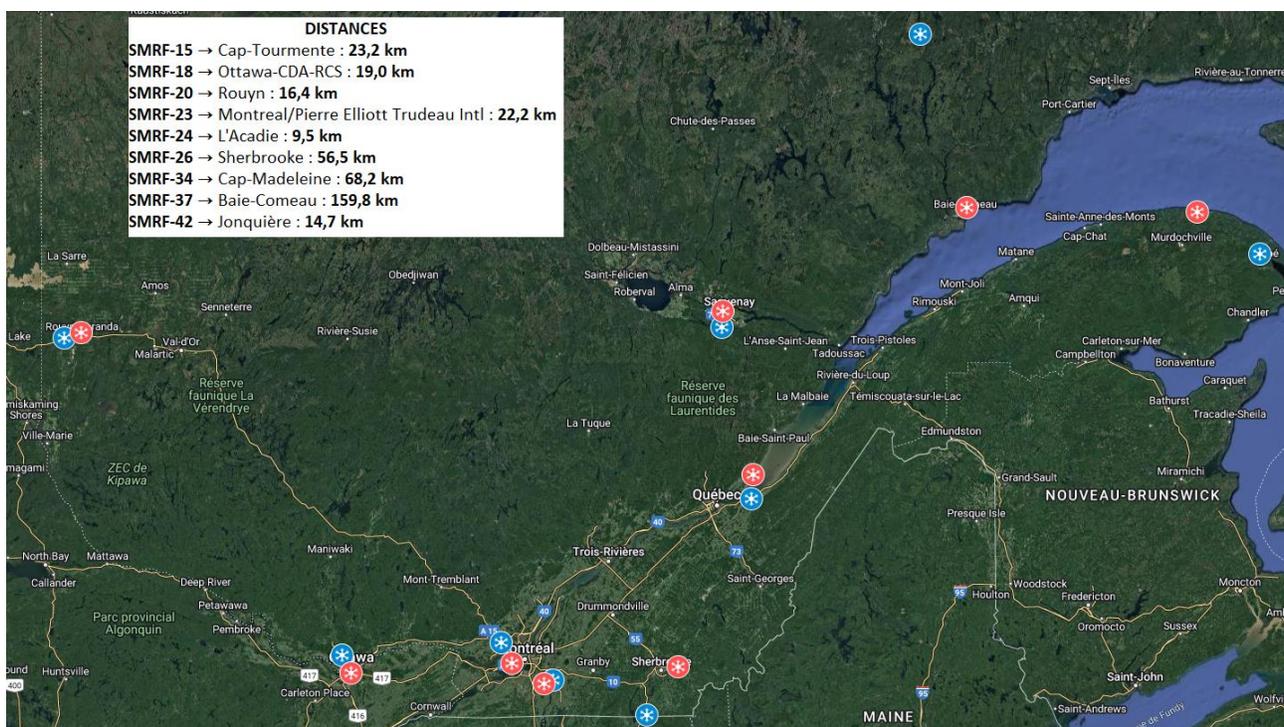


Figure 1: Localisation géographique des stations du MTMD (en bleu) et des stations d'Environnement Canada associées (en rouge)

C'est ainsi cette complémentarité entre les stations du MTMD et d'Environnement Canada – respectivement provinciales et fédérales – qui va permettre le calcul des indices de rigueur hivernale.

La figure 1 ci-dessus représente les positions géographiques des stations du MTMD, ainsi que celles des stations d'Environnement Canada correspondantes.

Le Tableau 8 présente les noms des neuf couples de stations, ainsi que la distance d'écart entre chaque entité de chaque paire. La distance entre la station SMRF-37 Manic-5 et celle de Baie-Comeau est conséquente : cela s'explique par le fait qu'il y a peu de stations fédérales dans cette partie du Québec, et que ces quelques stations présentent souvent des données

incomplètes. La station de Baie-Comeau est donc la station présentant des données complètes, et à jour, choisie comme association à celle de Manic-5.

Tableau 8: Paires de stations et distances d'écart entre leurs entités

Station MTMD	Station Environnement Canada	Distance (km)
SMRF-15 Saint-Vallier	Cap-Tourmente	23,2
SMRF-18 Chelsea	Ottawa-CDA-RCS	19,0
SMRF-20 Rouyn-Noranda	Rouyn	16,4
SMRF-23 Sainte-Thérèse	Montreal/Pierre Elliott Trudeau Intl	22,2
SMRF-24 Saint-Jean-sur-Richelieu	L'Acadie	9,5
SMRF-26 Stanstead	Sherbrooke	56,5
SMRF-34 Gaspé	Cap-Madeleine	68,2
SMRF-37 Manic-5	Baie-Comeau	159,8
SMRF-42 Saguenay	Jonquière	14,7

4.3 Fusion des données du MTMD avec les données d'Environnement Canada

4.3.1 Formatage des fichiers de sortie comme outils d'analyse

L'étape suivante est de fusionner ces deux sources de données au sein de mêmes fichiers, qui seront uniques par mois et par station. Ces fichiers obtenus serviront à l'analyse et à l'application numérique des indices de rigueur hivernale.

Le principal enjeu est l'échelle temporelle : comme vu plus haut, les données du MTMD sont aux dix minutes, tandis que les données d'Environnement Canada sont quotidiennes.

La solution choisie est d'élargir le pas de temps du MTMD à la journée. Cela se justifie par le fait que la plupart des indices de rigueur hivernale ont besoin d'un pas de temps suffisamment grand, et que beaucoup d'entre eux utilisent en cela la journée. Pour agréger à la journée les données numériques du MTMD, la moyenne est utilisée pour l'ensemble des variables, sauf pour la température minimale (on garde le minimum) la température maximale (on garde le maximum), et la vitesse maximale du vent (on garde le maximum). Pour agréger les variables catégorielles de codes d'état de la surface de la route, le mode est utilisé, c'est-à-dire que la donnée la plus récurrente au sein de chaque journée est conservée pour caractériser cette journée. De plus, un pourcentage journalier de temps de chaussée gelée est calculé à partir des données aux dix minutes.

Finalement, des fichiers mensuels par station sont obtenus. Ces fichiers comprennent une ligne de données par jour, et sont constitués de colonnes qui cumulent tous les champs exploitables des données du MTMD, ainsi que tous les champs exploitables des données d'Environnement Canada.

4.3.2 Comparaison statistique des deux sources

Une étape de vérification est ensuite effectuée pour comparer les deux sources et leur cohérence. Les variables communes entre elles sont la température maximale, la température minimale, la température moyenne et la vitesse de la rafale de vent maximale. À partir de la température moyenne, la différence est calculée, puis la moyenne, la médiane et l'écart-type de cette différence sont recensés. L'échantillon d'étude est constitué de tous les mois, de janvier 2018 à décembre 2022.

Voici les résultats obtenus pour chacune des neuf paires de stations à l'étude.

Tableau 9: Statistiques sur la différence entre la température moyenne d'Environnement Canada et la température moyenne du MTMD, pour chaque paire de stations (°C)

Station	Moyenne	Médiane	Écart-type
SMRF-15	-0,15	-0,11	1,77
SMRF-18	0,97	1,14	1,56
SMRF-20	0,29	0,35	1,98
SMRF-23	0,42	0,40	1,55
SMRF-24	-1,00	-0,82	1,55
SMRF-26	-0,95	-0,75	1,87
SMRF-34	-0,39	-0,38	1,81
SMRF-37	1,83	1,62	2,79
SMRF-42	0,42	0,53	1,67

Pour toutes les stations excepté la SMRF-37, les écarts statistiques entre la température moyenne des deux sources de données sont relativement faibles. Les moyennes et médianes ne dépassent jamais 1 degré Celsius en valeur absolue, excepté la médiane pour SMRF-18. Cela confirme qu'il n'y a pas de différence significative entre les sources.

En revanche, pour la station SMRF-37, cela est plus discutable. Cependant, comme vu précédemment, la distance entre les stations de Manic-5 et de Baie-Comeau est de 159,8 km, ce qui peut permettre de justifier cet écart important. On peut également noter une différence d'altitude majeure entre ces deux stations.

Les données du MTMD et celles d'Environnement Canada apparaissent ainsi bien comme cohérentes : les deux peuvent être utilisées indépendamment.

Il est alors décidé que les données du MTMD seront utilisées en priorité pour le calcul des indices, puis celles d'Environnement Canada dans les cas où il resterait des paramètres à caractériser.

4.4 Qualité des données

4.4.1 Limites rencontrées

Comme abordé précédemment, c'est l'association des données météorologiques du MTMD et d'Environnement Canada qui a permis de calculer

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEL INDICE DE RIGUEUR HIVERNALE AU QUÉBEC

la valeur des indices de rigueur hivernaux. Cependant, ces données provinciales et fédérales sont toutes deux parfois incomplètes ou incohérentes.

Voici les limites rencontrées en lien avec les données météorologiques des stations provinciales et fédérales :

- Un ou plusieurs capteurs essentiels au calcul des indices de rigueur hivernale sont indisponibles, sur une longue période ou par intermittence ;
- Un ou plusieurs types de données sont indisponibles, sur une longue période ou par intermittence ;
- Un ou plusieurs types de données sont incohérents, sur une longue période ou par intermittence ;
- Le mois d'avril 2019 contient des données redondantes et potentiellement erronées, et ce pour la totalité des stations – cela est possiblement lié à un problème dans l'extraction des données. Il a donc été décidé de laisser ce mois de côté pour ne pas biaiser les calculs.

Les tableaux ci-dessous montrent en détail les problématiques rencontrées avec les données météorologiques provinciales et fédérales sur la période de phase d'expérimentation des indices, c'est-à-dire pour chaque année de 2018 à 2022. En vert, les données étaient complètes. En orange, au moins une limite a été rencontrée.

Tableau 10: Disponibilité des données météorologiques pour l'année 2018

Station	Nom	Capteur sol	2018											
			Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
SMRF_15	Saint-Vallier (Québec)	IRS32	Pas de capteur LufData1 jusqu'au 26 septembre 2018 (donc Ontario impossible)											
SMRF_18	Chelsea (Ottawa)	LufData1												
SMRF_20	Rouyn-Noranda (Rouyn)	LufData2												
SMRF_23	Sainte-Thérèse (Montréal)	LufData1												
SMRF_24	Saint-Jean-sur-Richelieu (idem)	LufData1												
SMRF_26	Stanstead (Sherbrooke)	LufData1												
SMRF_34	Gaspé (Gaspé)	LufData1												
SMRF_37	Manic-5 (Baie-Comeau)	IRS31 (à partir du 29 octobre 2018) et LufData1 avant (jusqu'au 18 septembre 2018)	Nouvelle station météo (on passe de Cap-Madeleine à Gaspé Airport)											
SMRF_42	Saguenay (Saguenay)	LufData1 (jusqu'au 10 novembre 2021), puis IRS31 (à partir du 1er janvier 2022)												

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEL INDICE DE RIGUEUR HIVERNALE AU QUÉBEC

Tableau 11: Disponibilité des données météorologiques pour l'année 2019

Station	Nom	Capteur sol	2019												
			Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	
SMRF_15	Saint-Vallier (Québec)	IRS32				Problèmes fichiers MTMD									
SMRF_18	Chelsea (Ottawa)	LufData1				Problèmes fichiers MTMD									
SMRF_20	Rouyn-Noranda (Rouyn)	LufData2				Problèmes fichiers MTMD									
SMRF_23	Sainte-Thérèse (Montréal)	LufData1				Problèmes fichiers MTMD									
SMRF_24	Saint-Jean-sur-Richelieu (idem)	LufData1				Problèmes fichiers MTMD									
SMRF_26	Stanstead (Sherbrooke)	LufData1				Problèmes fichiers MTMD									
SMRF_34	Gaspé (Gaspé)	LufData1	Nouvelle station météo (on passe de Cap-Madeleine à Gaspé Airport)												
SMRF_37	Manic-5 (Baie-Comeau)	IRS31 (à partir du 29 octobre 2018) et LufData1 avant (jusqu'au 18 septembre 2018)				Problèmes fichiers MTMD			Fichier CS105_10 seulement jusqu'au 17 septembre inclus			Fichier CS105_10 seulement à partir du 10 octobre			
SMRF_42	Saguenay (Saguenay)	LufData1 (jusqu'au 10 novembre 2021), puis IRS31 (à partir du 1er janvier 2022)				Problèmes fichiers MTMD			Données jusqu'au 18 juillet inclus		Pas de données MTMD		Données à partir du 12 septembre inclus		

Tableau 12: Disponibilité des données météorologiques pour l'année 2020

Station	Nom	Capteur sol	2020											
			Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
SMRF_15	Saint-Vallier (Québec)	IRS32												
SMRF_18	Chelsea (Ottawa)	LufData1												
SMRF_20	Rouyn-Noranda (Rouyn)	LufData2	Pas fichier HMP45C10			Pas de précipitations EC -> Nouvelle station (Earlton Climate ON)								
SMRF_23	Sainte-Thérèse (Montréal)	LufData1												
SMRF_24	Saint-Jean-sur-Richelieu (idem)	LufData1	Pas fichier CS105_10											
SMRF_26	Stanstead (Sherbrooke)	LufData1												
SMRF_34	Gaspé (Gaspé)	LufData1	Pas fichier CS105_10											
SMRF_37	Manic-5 (Baie-Comeau)	IRS31 (à partir du 29 octobre 2018) et LufData1 avant (jusqu'au 18 septembre 2018)				Pas de données du 16 au 30 inclus								
SMRF_42	Saguenay (Saguenay)	LufData1 (jusqu'au 10 novembre 2021), puis IRS31 (à partir du 1er janvier 2022)	Pas fichiers MMRTS ni Wind1_10											

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEL INDICE DE RIGUEUR HIVERNALE AU QUÉBEC

Tableau 13: Disponibilité des données météorologiques pour l'année 2021

Station	Nom	Capteur sol	2021											
			Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
SMRF_15	Saint-Vallier (Québec)	IRS32	<div style="position: absolute; top: 10%; left: 50%; transform: translate(-50%, -50%); font-size: 0.8em;"> Données jusqu'au 17 juin inclus </div> <div style="position: absolute; top: 15%; left: 50%; transform: translate(-50%, -50%); font-size: 0.8em;"> Données à partir du 21 juillet inclus </div> <div style="position: absolute; top: 20%; left: 50%; transform: translate(-50%, -50%); font-size: 0.8em;"> 23 jours sur 31 </div> <div style="position: absolute; top: 30%; left: 40%; font-size: 0.8em;"> Données jusqu'au 20 mai inclus </div> <div style="position: absolute; top: 35%; left: 40%; font-size: 0.8em;"> Pas de données entre le 10 et 19 mai inclus </div> <div style="position: absolute; top: 50%; left: 65%; font-size: 0.8em;"> Pas de données jusqu'au 13 septembre inclus </div> <div style="position: absolute; top: 65%; left: 65%; font-size: 0.8em;"> Pas de données du 22 au 28 inclus </div> <div style="position: absolute; top: 80%; left: 75%; font-size: 0.8em;"> LufData1 et MMRTS jusqu'au 10 novembre inclus </div> <div style="position: absolute; top: 80%; left: 80%; font-size: 0.8em;"> Pas de LufData1 ni de MMRTS </div>											
SMRF_18	Chelsea (Ottawa)	LufData1												
SMRF_20	Rouyn-Noranda (Rouyn)	LufData2												
SMRF_23	Sainte-Thérèse (Montréal)	LufData1												
SMRF_24	Saint-Jean-sur-Richelieu (idem)	LufData1												
SMRF_26	Stanstead (Sherbrooke)	LufData1												
SMRF_34	Gaspé (Gaspé)	LufData1												
SMRF_37	Manic-5 (Baie-Comeau)	IRS31 (à partir du 29 octobre 2018) et LufData1 avant (jusqu'au 18 septembre 2018)												
SMRF_42	Saguenay (Saguenay)	LufData1 (jusqu'au 10 novembre 2021), puis IRS31 (à partir du 1er janvier 2022)												

Tableau 14: Disponibilité des données météorologiques pour l'année 2022

Station	Nom	Capteur sol	2022 (système différent)											
			Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
SMRF_15	Saint-Vallier (Québec)	IRS32	<div style="position: absolute; top: 10%; left: 60%; font-size: 0.8em;"> Données seulement pour deux jours (2 et 30 septembre) </div> <div style="position: absolute; top: 10%; left: 80%; font-size: 0.8em;"> Données jusqu'au 23 décembre inclus </div> <div style="position: absolute; top: 25%; left: 30%; font-size: 0.8em;"> Capteur LufData non fonctionnel (des valeurs fausses jusqu'à juin 2022 puis plus rien) ; MMRTS disparaît également à partir du 29 juin 2022 </div> <div style="position: absolute; top: 40%; left: 35%; font-size: 0.8em;"> LufData1 défaillant </div> <div style="position: absolute; top: 60%; left: 35%; font-size: 0.8em;"> Pas de données MTMD </div>											
SMRF_18	Chelsea (Ottawa)	LufData1												
SMRF_20	Rouyn-Noranda (Rouyn)	LufData2												
SMRF_23	Sainte-Thérèse (Montréal)	LufData1												
SMRF_24	Saint-Jean-sur-Richelieu (idem)	LufData1												
SMRF_26	Stanstead (Sherbrooke)	LufData1												
SMRF_34	Gaspé (Gaspé)	LufData1												
SMRF_37	Manic-5 (Baie-Comeau)	IRS31 (à partir du 29 octobre 2018) et LufData1 avant (jusqu'au 18 septembre 2018)												
SMRF_42	Saguenay (Saguenay)	LufData1 (jusqu'au 10 novembre 2021), puis IRS31 (à partir du 1er janvier 2022)												

Des limites ont également été rencontrées avec les données opérationnelles de viabilité hivernale, comme précisé par le Ministère. Ces données sont en effet rentrées manuellement, et certaines sont obligatoires, tandis que d'autres sont facultatives. Le remplissage de celles-ci n'est d'ailleurs pas toujours fait à l'instant même, mais parfois avec un certain délai, ce qui peut fausser la mémoire des détails.

Ainsi, la représentativité de la réalité peut être amoindrie pour certaines données opérationnelles, par exemple la durée des opérations.

4.4.2 Résolution des limites

La problématique commune à de nombreuses stations d'Environnement Canada a été l'indisponibilité des données liées aux précipitations. Ainsi, comme expliqué précédemment, ce sont les stations d'Environnement Canada étant les plus proches géographiquement des stations du MTMD et présentant des données de précipitations complètes qui ont été privilégiées. Dans certains cas, plusieurs stations d'Environnement Canada présentaient des données incomplètes, ce qui a donc augmenté les distances entre les stations provinciales et fédérales.

Toutes les problématiques liées à des données et/ou capteurs manquants n'ont pas pu être résolues. Concernant les mois avec des données incomplètes ou incohérentes, il a été choisi de les enlever pour ne pas biaiser les résultats globaux. Comme évoqué plus haut, le mois d'avril 2019 procurait des données inexploitable, il a donc été laissé de côté pour l'analyse.

Ainsi, les indices de rigueur hivernale calculés peuvent présenter, selon les cas, certains mois manquants.

Enfin, il n'y a pas eu de changements à proprement parler sur les données opérationnelles de viabilité hivernale, si ce n'est que les données les moins fiables, comme la durée des opérations, n'ont pas été choisies pour servir de référence à la calibration des nouveaux IRH développés.

5 RÉSULTATS

5.1 Sélection des indices applicables au contexte québécois

Parmi les différents indices présentés en partie 2, six sont retenus pour procéder à l'application numérique. Dans cette partie, les six indices sont d'abord présentés en détail, puis les applications numériques sont effectuées et interprétées. Ensuite, des corrélations sont recherchées avec les données opérationnelles de viabilité hivernale. Enfin, à partir de ces analyses, deux nouveaux indices québécois de rigueur hivernale sont développés.

5.1.1 Indice du Québec – INRS

La formule de calcul de l'indice de rigueur hivernale développé par l'INRS, en considérant les données quotidiennes, est la suivante (Hammami et al., 2014) :

$$IRH_J = \sum_{j=1}^N \left[S_{C_{neige}} 1_{F_{neige}}(j) + S_{C_{glace}} 1_{F_{glace}}(j) \right]$$

Cet indice comporte deux composantes : une de neige et une de glace.

Les variables de la formule se définissent ainsi :

- $S_{C_{neige}}$
 - Valeur = 0,2 si les précipitations de neige sont comprises entre 0,4 cm et 1,9 cm
 - Valeur = 0,5 si les précipitations de neige sont comprises entre 2 cm et 4,9 cm
 - Valeur = 1 si les précipitations de neige sont supérieures à 5 cm
- $1_{F_{neige}}(j)$
 - Valeur = 1 si l'un des seuils de neige ci-dessus est atteint au jour j
 - Valeur = 0 sinon
- $S_{C_{glace}}(j)$
 - Valeur = 0,5 si les précipitations de neige sont inférieures à 0,4 cm, les précipitations de pluie sont supérieures à 0,4 mm, et la température minimale est inférieure à -2°C
- $1_{F_{glace}}(j)$
 - Valeur = 1 si le seuil de glace ci-dessus est atteint au jour j
 - Valeur = 0 sinon
- N représente le nombre de jours de la période d'étude choisie (mois ou saison hivernale par exemple).

5.1.2 *Indice de l'Ontario*

La structure du calcul de l'indice de rigueur hivernale de l'Ontario est détaillée dans le tableau ci-dessous.

Un score quotidien est établi, selon 5 événements qui peuvent l'incrémenter :

- La composante de précipitations de neige : trois paliers de score distincts selon la quantité en centimètres.
- La composante de glaçage de la surface de la route : deux paliers de score distincts, selon la fréquence où la surface de la route est glacée, lorsque les précipitations de neige sont faibles.
- La composante de précipitations de pluie avec de faibles températures : un palier de score qui s'active lorsque les précipitations de pluie sont élevées, les précipitations de neige sont faibles, la température minimale est suffisamment froide, et la composante de glaçage de la surface de la route ne s'active pas.
- La composante de poudrierie : un palier de score qui s'active lorsque les précipitations quotidiennes sont faibles, la composante de glaçage de la surface de la route ne s'active pas, la composante de précipitations de pluie avec de faibles températures ne s'active pas, la vitesse des vents est suffisamment élevée, et l'accumulation des précipitations de neige au cours des trois derniers jours est suffisamment élevée.
- La composante de série de jours froids : un palier de score qui s'active lorsque les précipitations quotidiennes sont faibles, la composante de glaçage de la surface de la route ne s'active pas, la composante de précipitations de pluie avec de faibles températures ne s'active pas, la composante de poudrierie ne s'active pas, et la température maximale lors des trois jours précédents est suffisamment faible.

Le score total obtenu en sommant ces cinq composantes peut ensuite être revu à la baisse de 45%, selon un facteur d'ajustement de temps chaud. Ce facteur s'active si au moins une des cinq composantes précédentes s'active, et si la moyenne des températures moyennes des six jours centrés autour du jour d'étude est strictement supérieure à -1°C .

Enfin, le score global pour une période donnée (mois ou saison hivernale par exemple) s'obtient en sommant les scores quotidiens correspondants à cette période.

Tableau 15: Méthode de calcul de l'indice de rigueur hivernale ontarien (source : Matthews et al., 2017)

Composante météorologique	Seuils des composantes	Score	Pourcentage du score total*
Neige	Faible quantité de neige (de 0,2 à 1,9 cm)	0,5	84,9 %
	Quantité de neige modérée (de 1,91 à 4,9 cm)	1	
	Grande quantité de neige (plus de 4,91 cm)	1,3	
Présence de glace sur la route	Faible : < 0,2 cm de chute de neige journalière, et entre 25 % et 70 % d'avertissement de présence de glace sur la route.	0,3	7,5 %
	Élevé : < 0,2 cm de chute de neige journalière, et plus de 70 % d'avertissement de présence de glace sur la route.	0,8	
Pluie avec faibles températures	Chute de neige journalière < 0,2 cm, Conditions pour présence de glace non remplies, Chute de pluie journalière ≥ 0,4 mm, Température minimale inférieure à -0,2°C.	0,4	5,8 %
Poudrierie	Précipitations journalières < 0,2 mm, Conditions pour présence de glace non remplies, Conditions pour pluie avec faibles températures non remplies, Vitesse du vent ≥ 15 km/h, Accumulation de neige pendant les trois jours précédents ≥ 5 cm.	0,5	1,0 %
Séries de jours froids	Précipitations journalières < 0,2 mm, Conditions pour présence de glace non remplies, Conditions pour pluie avec faibles températures non remplies, Conditions pour poudrierie non remplies, Température maximale des trois derniers jours, inférieure à -12°C.	0,5	0,9 %
Facteur d'ajustement pour temps chaud	Si AU MOINS UNE des composantes météorologiques a été rencontrée ET que la température moyenne pour la période de 6 jours centrée sur le jour pour lequel le score est calculé est supérieure à -1°C.	- 45 % retiré au score journalier	18,8 %**

* Score total avant le facteur d'ajustement pour temps chaud.
** En moyenne, le facteur d'ajustement pour temps chaud réduit les scores de l'indice de 18,8 %.

5.1.3 Indice de l'échelle fédérale américaine - SHRP

L'indice de rigueur hivernale de l'échelle fédérale américaine s'exprime selon la formule ci-dessous. Son échelle de temps est au mois, ou à la saison hivernale entière (Walker et al., 2019b).

$$WI_{SHRP} = -25,58 \times \sqrt{T_{index}} - 35,68 \times \ln\left(\frac{S_{daily}}{10} + 1\right) - 99,5 \times \sqrt{\left(\frac{d_{freez}}{T_{range} + 10}\right)} + 50$$

Les variables de cette formule se définissent ainsi :

- T_{index}
 - o Valeur = 0 si la température minimum est au-dessus de 0°C

- Valeur = 1 si la température max est au-dessus de 0°C et le minimum est en dessous de 0°C
- Valeur = 2 si la température max est inférieure ou égale à 0°C
- S_{daily}
 - Valeur moyenne journalière de tombée de neige (en mm)
- d_{freez}
 - Valeur du nombre de jours où la température moyenne était inférieure ou égale à 0°C sur le temps donné, 0 étant aucun et 1 étant tous – $0 < d_{freez} < 1$
- T_{range}
 - (Moyenne de la température max au mois) – (moyenne de la température minimale au mois)

5.1.4 Indice de l'Illinois

L'indice de rigueur hivernale de l'Illinois s'exprime selon la formule ci-dessous. Son échelle de temps est au mois, ou à la saison hivernale entière (Walker et al., 2019b).

$$WI_{Illinois} = D_{Snow} + D_{cold}$$

Les variables de cette formule se définissent ainsi :

- D_{Snow}
 - Nombre de jours pour lesquels les chutes de neige étaient supérieures ou égale à 1,3 cm par jour
- D_{cold}
 - Nombre de jours pour lesquels la température moyenne était comprise entre - 9°C et - 1°C

5.1.5 Indice de la Pennsylvanie

L'indice de rigueur hivernale de la Pennsylvanie s'exprime selon la formule ci-dessous. Son échelle de temps est au mois, ou à la saison hivernale entière (Walker et al., 2019b).

$$SI_{Penn} = S_{season} + 2D_{med} + D_{hvy} + D_{frost} - \frac{D_{freeze}}{2} + H_{si}$$

Les variables de cette formule se définissent ainsi :

- S_{season}
 - Quantité totale de neige sur la période donnée (en pouces)
- D_{med}

- Nombre de jour avec une quantité de neige entre 1 et 6 pouces
- D_{hvy}
 - Nombre de jours avec une quantité de neige supérieure à 6 pouces
- D_{frost}
 - Nombre de jours avec une température max supérieure à 0°C et une température minimale inférieure à 0°C
- D_{freeze}
 - Nombre de jours avec une température moyenne inférieure à 0°C
- H_{si}
 - Nombre d'heures totales pendant lesquelles il a neigé ou il y a eu la présence de glace

5.1.6 *Indice de la Pologne*

L'indice de rigueur hivernale de la Pologne s'exprime selon la formule ci-dessous. Son échelle de temps est au mois, ou à la saison hivernale entière (Szyga-Pluta, 2022).

$$W_{sev} = (1 - 0,25 \times t) \times 0,8325 + 0,0144 \times d_w + 0,0087 \times d_f + 0,0045 \times d_{vf} - 0,0026 \times S_t$$

Les variables de cette formule se définissent ainsi :

- t
 - Température moyenne de la saison hivernale (ou de la période donnée)
- d_w
 - Nombre de jours avec une température moyenne inférieure à 0°C
- d_f
 - Nombre de jours avec une température max inférieure à 0°C
- d_{vf}
 - Nombre de jours avec une température max inférieure à -10°C
- S_t
 - Somme de la température moyenne inférieure à 0°C sur la période donnée

5.2 Expérimentation des indices

Les applications numériques ont été effectuées grâce au logiciel R. Les formules des indices y sont codées, avant d'être appliquées aux fichiers de données construits au préalable.

Afin de pouvoir observer et comparer le comportement des indices pour chaque station, leurs valeurs ont ensuite été normalisées. De plus, les valeurs de l'indice SHRP, qui sont négatives, ont été multipliées par -1 afin de les rendre absolues et de pouvoir les comparer avec celles des autres indices.

Ci-dessous, à partir de la page suivante, sont les graphiques bruts puis normalisés des résultats obtenus pour les six indices, pour la période de janvier 2018 à décembre 2022 et pour les stations SMRF-15 et SMRF-18. Chaque graphique présente une paire de stations MTMD – Environnement Canada. Les résultats obtenus pour les autres stations sont en annexe 1.

On peut notamment constater que tous les indices forment un plateau minimal stable durant les mois d'été, sauf l'indice de la Pologne qui garde une continuité. Les maxima sont eux atteints pour les mois d'hiver, principalement de novembre à avril. Même si les indices varient les uns par rapport aux autres, ils suivent tous ces tendances. On peut voir également des variations au sein des hivers : les valeurs maximales de rigueur sont souvent atteintes en janvier et février.

On remarque que la saison 2018-2019, connue pour avoir été un hiver problématique, présente effectivement des pics de maxima pour la plupart des indices.

En conclusion, pour l'ensemble des stations, on remarque que les six indices suivent un comportement assez similaire et concordant avec la réalité. Cela montre qu'ils semblent cohérents et robustes pour définir la rigueur hivernale québécoise, pour la période de janvier 2018 à décembre 2022.

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEL INDICE DE RIGUEUR HIVERNALE AU QUÉBEC

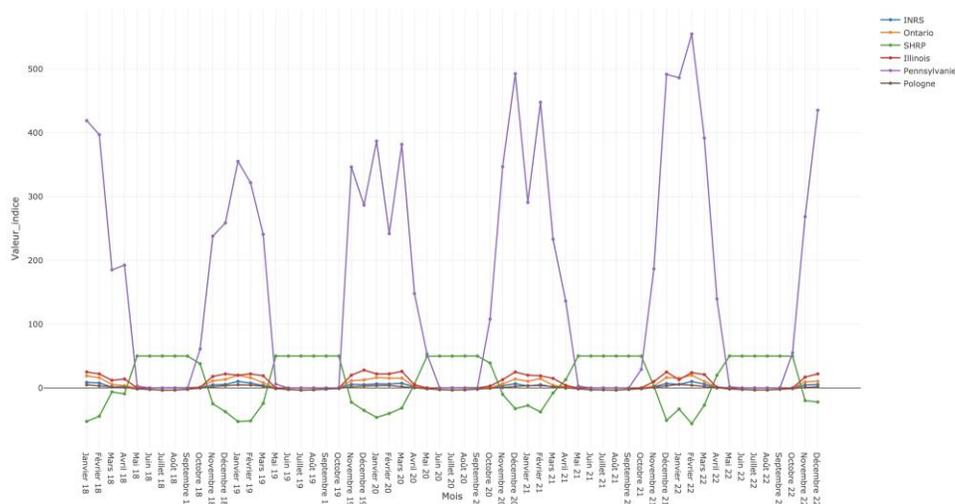


Figure 2: Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-15 (valeurs brutes)

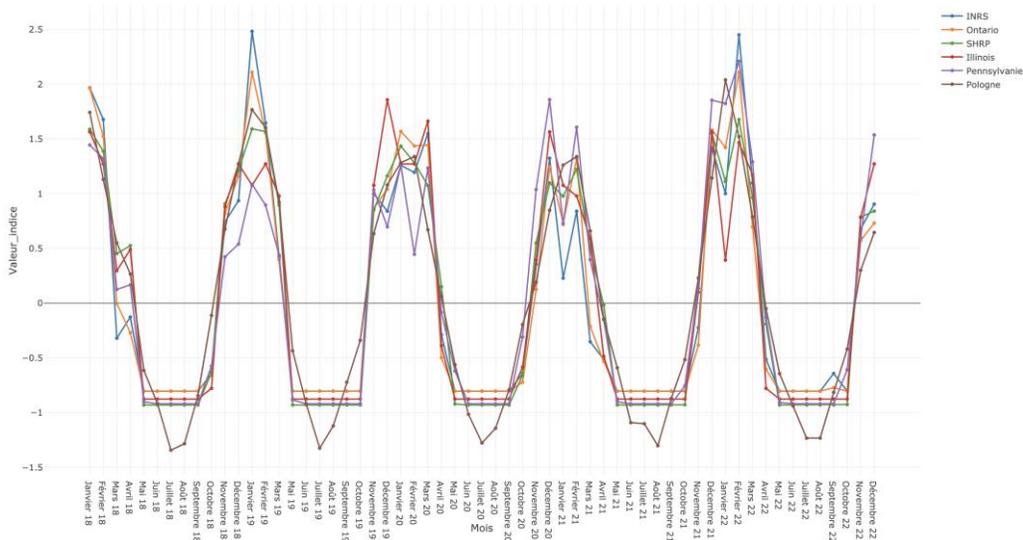


Figure 3: Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-15 (valeurs normalisées)

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEL INDICE DE RIGUEUR HIVERNALE AU QUÉBEC

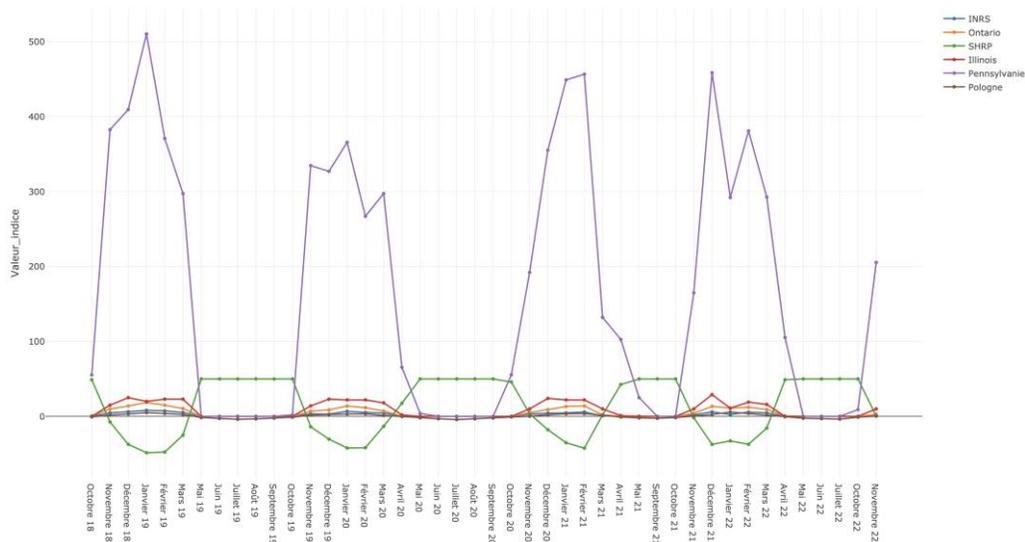


Figure 4: Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-18 (valeurs brutes)

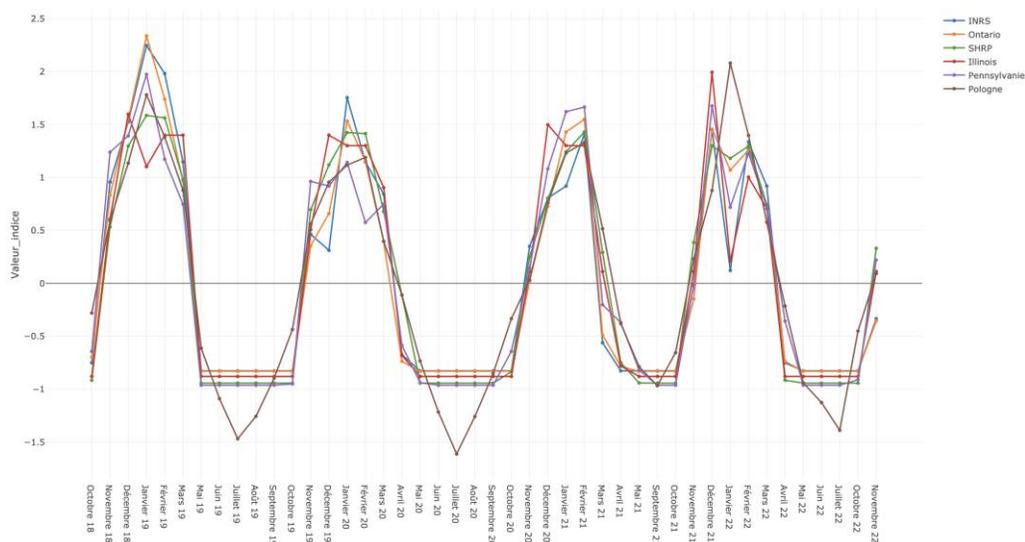


Figure 5: Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-18 (valeurs normalisées)

5.3 Corrélations entre les indices et les données sur les opérations de viabilité hivernale

Afin de déterminer quels indices de rigueur hivernale seraient les plus pertinents pour le Québec, les valeurs des indices pour la période de janvier 2018 à décembre 2022 ont été corrélées avec les données opérationnelles (nombre d'opérations, durée totale des opérations, quantité totale de sel, quantité totale d'abrasifs), et ce pour toutes les stations. Pour chaque station, la valeur des indices a été associée aux données opérationnelles de la direction générale territoriale (DG) sur laquelle elle est située. Puis, le même

exercice a été effectué en utilisant les données opérationnelles des centres de services (CS) sur lesquels sont situées les stations. Le tableau en suivant montre les directions générales territoriales et les centres de services étant associés à chaque station du Ministère.

Tableau 16: Directions générales territoriales et centres de services associés aux stations du Ministère

Station MTMD	Direction générale territoriale	Centre de services
SMRF-15	DG de la Chaudière-Appalaches	Saint-Charles de Bellechasse
SMRF-18	DG de l'Outaouais	Gatineau
SMRF-20	DG de l'Abitibi-Témiscamingue	Rouyn-Noranda
SMRF-23	DG des Laurentides-Lanaudière	Saint-Jérôme (territoire), Saint-Sauveur (équipements)
SMRF-24	DG de la Montérégie	Saint-Jean-sur-Richelieu
SMRF-26	DG de l'Estrie	Magog
SMRF-34	DG du Bas-Saint-Laurent-Gaspésie-Îles-de-la-Madeleine	Gaspé
SMRF-37	DG de la Côte-Nord	Baie-Comeau
SMRF-42	DG du Saguenay-Lac-Saint-Jean-Chibougamau	Chicoutimi

Une fois obtenues, les corrélations ont ensuite pu être comparées entre elles. Il a alors été remarqué que les meilleures corrélations sont obtenues en utilisant les données opérationnelles des directions générales territoriales, et non celles des centres de services. Une explication possible est que les données sont en plus faible quantité pour les centres de services que pour les directions générales territoriales : elles y sont donc plus parcellaires, peut-être moins fiables et avec une plus forte dispersion.

Les tableaux ci-dessous montrent la corrélation moyenne -pour chaque mois des quatre saisons hivernales étudiées- entre les valeurs des indices et les données opérationnelles des directions générales territoriales associées. Quatre variables sont utilisées pour caractériser les données opérationnelles : le nombre total d'opérations, la durée totale des opérations, la quantité totale de sel épandue, et la quantité totale d'abrasifs épandue. Les analyses sont faites successivement pour chacune des neuf stations, et les résultats correspondants sont présentés dans les tableaux ci-dessous.

L'indice du SHRP renvoyant des valeurs négatives, les valeurs absolues sont utilisées afin de procéder à la comparaison.

Par définition, un coefficient de corrélation est compris entre -1 et 1. Puisque les valeurs absolues sont considérées ici, les résultats peuvent varier entre 0 et 1. Plus la valeur est élevée (donc plus elle est proche de 1), meilleure est la corrélation entre les variables à l'étude. Une échelle de couleurs est utilisée : plus la cellule est verte, plus la corrélation est élevée.

Les tableaux utilisant les données opérationnelles des centres de services sont en annexe 2.

Tableau 17: Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles de la direction générale territoriale associée à la station SMRF-15

Indice	Station	nombre_operations	Total_duree_mn	Total_sel	Total_abrasifs
INRS	15	0,922	0,923	0,928	0,912
Ontario	15	0,963	0,956	0,954	0,949
SHRP	15	0,951	0,937	0,929	0,908
Illinois	15	0,887	0,866	0,862	0,823
Pennsylvanie	15	0,873	0,825	0,861	0,821
Pologne	15	0,963	0,958	0,934	0,948

Tableau 18: Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles de la direction générale territoriale associée à la station SMRF-18

Indice	Station	nombre_operations	Total_duree_mn	Total_sel	Total_abrasifs
INRS	18	0,902	0,876	0,914	0,911
Ontario	18	0,954	0,931	0,945	0,959
SHRP	18	0,92	0,929	0,914	0,91
Illinois	18	0,9	0,881	0,9	0,866
Pennsylvanie	18	0,929	0,876	0,879	0,905
Pologne	18	0,892	0,898	0,866	0,893

Tableau 19: Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles de la direction générale territoriale associée à la station SMRF-20

Indice	Station	nombre_operations	Total_duree_mn	Total_sel	Total_abrasifs
INRS	20	0,9	0,903	0,852	0,853
Ontario	20	0,915	0,916	0,85	0,879
SHRP	20	0,863	0,873	0,847	0,782
Illinois	20	0,791	0,8	0,85	0,656
Pennsylvanie	20	0,8	0,8	0,781	0,726
Pologne	20	0,903	0,907	0,782	0,903

Tableau 20: Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles de la direction générale territoriale associée à la station SMRF-23

Indice	Station	nombre_operations	Total_duree_mn	Total_sel	Total_abrasifs
INRS	23	0,96	0,954	0,927	0,954
Ontario	23	0,964	0,969	0,941	0,95
SHRP	23	0,962	0,953	0,927	0,936
Illinois	23	0,942	0,916	0,898	0,913
Pennsylvanie	23	0,957	0,962	0,925	0,932
Pologne	23	0,926	0,932	0,924	0,908

Tableau 21: Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles de la direction générale territoriale associée à la station SMRF-24

Indice	Station	nombre_operations	Total_duree_mn	Total_sel	Total_abrasifs
INRS	24	0,902	0,909	0,904	0,917
Ontario	24	0,955	0,932	0,943	0,921
SHRP	24	0,915	0,891	0,91	0,871
Illinois	24	0,827	0,783	0,835	0,789
Pennsylvanie	24	0,859	0,818	0,838	0,795
Pologne	24	0,954	0,925	0,94	0,899

Tableau 22: Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles de la direction générale territoriale associée à la station SMRF-26

Indice	Station	nombre_operations	Total_duree_mn	Total_sel	Total_abrasifs
INRS	26	0,774	0,76	0,769	0,769
Ontario	26	0,948	0,941	0,958	0,938
SHRP	26	0,921	0,904	0,9	0,897
Illinois	26	0,831	0,8	0,81	0,787
Pennsylvanie	26	0,673	0,635	0,674	0,65
Pologne	26	0,945	0,942	0,942	0,925

Tableau 23: Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles de la direction générale territoriale associée à la station SMRF-34

Indice	Station	nombre_operations	Total_duree_mn	Total_sel	Total_abrasifs
INRS	34	0,93	0,912	0,906	0,913
Ontario	34	0,977	0,983	0,938	0,956
SHRP	34	0,911	0,922	0,869	0,863
Illinois	34	0,867	0,862	0,801	0,824
Pennsylvanie	34	0,919	0,895	0,896	0,896
Pologne	34	0,953	0,97	0,914	0,927

Tableau 24: Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles de la direction générale territoriale associée à la station SMRF-37

Indice	Station	nombre_operations	Total_duree_mn	Total_sel	Total_abrasifs
INRS	37	0,726	0,721	0,675	0,708
Ontario	37	0,911	0,912	0,85	0,885
SHRP	37	0,866	0,871	0,781	0,827
Illinois	37	0,781	0,766	0,692	0,759
Pennsylvanie	37	0,833	0,812	0,75	0,812
Pologne	37	0,907	0,932	0,875	0,851

Tableau 25: Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles de la direction générale territoriale associée à la station SMRF-42

Indice	Station	nombre_operations	Total_duree_mn	Total_sel	Total_abrasifs
INRS	42	0,93	0,923	0,94	0,893
Ontario	42	0,956	0,945	0,97	0,929
SHRP	42	0,942	0,927	0,952	0,894
Illinois	42	0,831	0,785	0,842	0,73
Pennsylvanie	42	0,782	0,733	0,79	0,744
Pologne	42	0,936	0,937	0,948	0,948

À travers ces tableaux, on remarque que l'indice de l'Ontario semble présenter la meilleure corrélation avec les données opérationnelles des directions générales territoriales. L'indice de la Pologne arrive en deuxième position. Puis, les indices de l'INRS et du SHRP semblent également avoir une bonne corrélation. Ceux de l'Illinois et de la Pennsylvanie semblent, de leur côté, présenter une corrélation moins bonne.

On remarque des différences entre les stations, certaines d'entre elles présentant une moins bonne corrélation entre les indices et les données opérationnelles, notamment les stations SMRF-20 (Rouyn-Noranda), SMRF-26 (Stanstead) et SMRF-37 (Manic-5). À contrario, plusieurs stations présentent une forte corrélation entre indices et données opérationnelles : les stations SMRF-15 (Saint-Vallier), SMRF-23 (Sainte-Thérèse), SMRF-34 (Gaspé).

Les deux tableaux en suivant montrent les moyennes et médianes des coefficients de corrélation calculés précédemment, pour l'ensemble des stations. Pour le premier, les directions générales territoriales sont utilisées. Pour le second, ce sont les centres de services.

Tableau 26: Corrélation moyenne et médiane des indices de rigueur hivernale pour l'ensemble des stations étudiées, en utilisant les données opérationnelles des directions générales territoriales

Indice	mean_nombre	mean_duree	mean_sel	mean_abrasifs	median_nombre	median_duree	median_sel	median_abrasifs
Illinois	0,851	0,829	0,832	0,794	0,831	0,8	0,842	0,789
INRS	0,883	0,876	0,868	0,87	0,902	0,909	0,906	0,911
Ontario	0,949	0,943	0,928	0,93	0,955	0,941	0,943	0,938
Pennsylvanie	0,847	0,817	0,822	0,809	0,859	0,818	0,838	0,812
Pologne	0,931	0,933	0,903	0,911	0,936	0,932	0,924	0,908
SHRP	0,917	0,912	0,892	0,876	0,92	0,922	0,91	0,894

Tableau 27: Corrélation moyenne et médiane des indices de rigueur hivernale pour l'ensemble des stations étudiées, en utilisant les données opérationnelles des centres de services

Indice	moy_nombre	moy_duree	moy_sel	moy_abrasifs	median_nombre	median_duree	median_sel	median_abrasifs
Illinois	0,811	0,797	0,789	0,708	0,812	0,799	0,81	0,752
INRS	0,871	0,844	0,863	0,818	0,89	0,87	0,892	0,868
Ontario	0,923	0,905	0,904	0,876	0,929	0,914	0,923	0,919
Pennsylvanie	0,789	0,781	0,785	0,731	0,83	0,82	0,763	0,748
Pologne	0,888	0,875	0,861	0,844	0,887	0,895	0,897	0,901
SHRP	0,888	0,875	0,863	0,811	0,89	0,874	0,893	0,875

On observe que pour les deux échelles de territoire, l'indice de l'Ontario semble présenter la meilleure corrélation, suivi de l'indice de la Pologne.

Cela se confirme à travers le tableau suivant, qui fait le classement des indices présentant la meilleure corrélation, pour les deux échelles de territoire.

Ce tableau 28 vérifie au passage que l'échelle de la direction générale territoriale est plus adaptée que celle du centre de services. Les directions générales territoriales seront donc les entités administratives utilisées pour l'étude.

Tableau 28: Moyenne des corrélations des indices de rigueur hivernale pour l'ensemble des stations étudiées

Indice	Moyenne CS	Classement CS	Moyenne DG	Classement DG	Différence DG - CS (%)
Illinois	0,78475	5	0,821	6	3,625
INRS	0,8645	4	0,890625	4	2,6125
Ontario	0,911625	1	0,940875	1	2,925
Pennsylvanie	0,780875	6	0,82775	5	4,6875
Pologne	0,881	2	0,92225	2	4,125
SHRP	0,871125	3	0,905375	3	3,425

5.4 Développement d'un nouvel indice de rigueur hivernale au Québec

Après concertation avec les parties prenantes, il est décidé de construire deux indices : un indice « plus simple » ne dépendant que des températures, et un indice « plus complexe » dépendant de plusieurs catégories d'événements météorologiques. Comme illustré en partie précédente, l'indice de l'Ontario présente les meilleures corrélations, suivi de l'indice polonais.

L'approche choisie est alors de s'appuyer sur l'indice de la Pologne pour construire un indice basé uniquement sur la température (IBUT) et sur l'indice de l'Ontario pour construire un indice basé sur des catégories d'événements météorologiques (ICEM).

5.4.1 Construction de l'Indice Basé Uniquement sur la Température (IBUT)

Comme vu précédemment, voici l'expression de l'indice polonais originel.

$$W_{sev} = (1 - 0,25 \times t) \times 0,8325 + 0,0144 \times d_w + 0,0087 \times d_f + 0,0045 \times d_{vf} - 0,0026 \times S_t$$

L'indice est calculé comme combinaison linéaire de cinq variables dépendant exclusivement de la température.

Après développement du premier terme, le vecteur paramétrique obtenu est (0,8325 ; -0,2081 ; 0,0144 ; 0,0087 ; 0,0045 ; -0,0026) = (P1, P2, P3, P4, P5, P6). L'objectif est de trouver une nouvelle combinaison paramétrique qui maximise la corrélation avec les données opérationnelles historiques. Cela fournira un nouvel indice, uniquement basé sur la température, qui sera appelé IBUT. Comme l'indice de la Pologne, son échelle de temps sera au mois, ou à la saison hivernale entière.

Pour déterminer la combinaison optimale, il faut d'abord savoir pour quelle variable opérationnelle on l'optimise. Cinq grandeurs sont recensées plus

haut : le nombre d'opérations, la durée totale des opérations, la quantité totale de sel épandue, la quantité totale d'abrasifs épandue, la somme des quantités totales de sel et d'abrasifs épandues.

Une optimisation de régression linéaire est faite dans R par rapport à chacune de ces variables. À l'aide de la fonction « lm », différentes valeurs statistiques sont renvoyées : celles principales d'intérêt sont les coefficients estimés (« Estimate »), condensés via la sextuplet (P1', P2', P3', P4', P5', P6'), ainsi que la valeur du R au carré (« Multiple R-squared ») qui symbolise la pertinence de la régression. Plus la valeur du R au carré est proche de 1, meilleure est la régression, et donc meilleur est notre indice. Le modèle trouve la valeur de R au carré la plus élevée possible, avec les coefficients associés.

Ci-dessous les résultats renvoyés respectivement pour le nombre d'opérations, la durée totale des opérations, la quantité de sel épandue, la quantité d'abrasifs épandue, ainsi que la somme des quantités de sel et d'abrasifs épandues :

Tableau 29 : Valeurs statistiques des différentes régressions linéaires, selon la variable d'étude

Variable d'étude	Sextuplet (P1', P2', P3', P4', P5', P6')	R au carré
Nombre d'opérations	(644,911, -64,741, 79,186, -73,156, -105,905, -8,276)	0,4874
Durée totale des opérations	(119457,1, -12172,7, 10857,4, 768,9, -20731,9, -1155,0)	0,5463
Quantité totale de sel épandue	(885,52, -95,41, 428,65, -224,03, -139,94, -12,03)	0,5135
Quantité totale d'abrasifs épandue	(3834,10, -385,02, 168,40, 349,18, 656,19, 18,05)	0,5788
Somme des quantités totales de sel et d'abrasifs épandues	(4719,622, -480,431, 597,047, 125,148, 516,252, 6,025)	0,6208

Ici, le R au carré correspondant à la quantité de sel et d'abrasifs épandue (0,6208) est le plus élevé. Il est suivi respectivement de celui de la quantité totale d'abrasifs épandue (0,5788), de la durée totale des opérations (0,5463), de la quantité totale de sel épandue (0,5135), et enfin du nombre d'opérations (0,4874).

La conclusion est que la somme des quantités de sel et d'abrasifs est la variable la plus pertinente à utiliser, avec son sextuplet associé (4719,622 ; -480,431 ; 597,047 ; 125,148 ; 516,252 ; 6,025).

Il reste tout de même à comparer par rapport aux valeurs du R au carré données par le modèle originel. Après simulations, voici les comparaisons :

Tableau 30: Comparaison des valeurs du R au carré entre l'indice de la Pologne originel et l'indice final optimisé

Variable d'étude	R au carré originel	R au carré final
Nombre d'opérations	0,4651	0,4874
Durée totale des opérations	0,5237	0,5463
Quantité totale de sel épandue	0,4704	0,5135
Quantité totale d'abrasifs épandue	0,5624	0,5788
Somme des quantités totales de sel et d'abrasifs épandues	0,6090	0,6208

Quelle que soit la variable d'étude choisie, la régression linéaire optimisée avec les données opérationnelles du MTMD permet d'améliorer l'indice originel. L'augmentation est visible mais pas exponentielle, ce qui est logique puisque les coefficients de corrélation originels étaient déjà élevés, comme constaté en partie précédente.

La combinaison choisie est donc celle qui maximise le R au carré, autrement dit, le sextuplet (4719,622 ; -480,431 ; 597,047 ; 125,148 ; 516,252 ; 6,025).

Enfin, pour que l'indice finale ait des valeurs dans le même ordre de grandeur que l'indice initial, une réduction est effectuée. En effet, diviser chacun des coefficients par une même constante n'influe pas sur la corrélation. La constante est choisie telle que les ordonnées à l'origine entre les deux indices soient égales, donc telle que $P1' = P1$. Puisque $P1 = 0,8325$, la constante C vaut $4719,622 / 0,8325 = 5669,216$. Tous les coefficients optimisés sont divisés par C, pour aboutir aux coefficients finaux de l'IBUT.

Voici donc le résumé de la transformation :

Tableau 31 : Évolution et méthode détermination des coefficients de l'IBUT

Paramètre	Valeur initiale	Valeur finale	Valeur finale réduite (après division par C)
P1	0,8325	4719,622	0,8325
P2	-0,2081	-480,431	-0,0847
P3	0,0144	597,047	0,1053
P4	0,0087	125,148	0,0220
P5	0,0045	516,252	0,0911
P6	-0,0026	6,025	0,0011

Comme vu plus haut, la valeur du R au carré, avec la quantité totale épandue de sel et d'abrasifs comme variable d'étude, a augmenté pour l'IBUT par rapport à l'indice de la Pologne, ce qui caractérise une amélioration.

En conclusion, la formule finale proposée pour l'IBUT est :

$$IBUT = 0,8325 - 0,0847 \times t + 0,1053 \times d_w + 0,0220 \times d_f + 0,0911 \times d_{vf} + 0,0011 \times S_t$$

Comme dans l'indice polonais originel, les variables de cette formule se définissent ainsi :

- t
 - Température moyenne de la saison hivernale (ou de la période donnée)
- d_w
 - Nombre de jours avec une température moyenne inférieure à 0°C
- d_f
 - Nombre de jours avec une température max inférieure à 0°C
- d_{vf}
 - Nombre de jours avec une température max inférieure à -10°C
- S_t
 - Somme de la température moyenne inférieure à 0°C sur la période donnée

Comme le montrent ces variables, et comme le nom de l'indice l'indique, l'IBUT ici construit est entièrement caractérisé par les mesures de température de l'atmosphère. Avoir ces données est donc suffisant pour le calculer.

5.4.2 Expérimentation de l'indice IBUT

Voici ci-dessous un graphique représentant les valeurs mensuelles de l'IBUT, pour les cinq années d'étude et les neuf stations superposées :

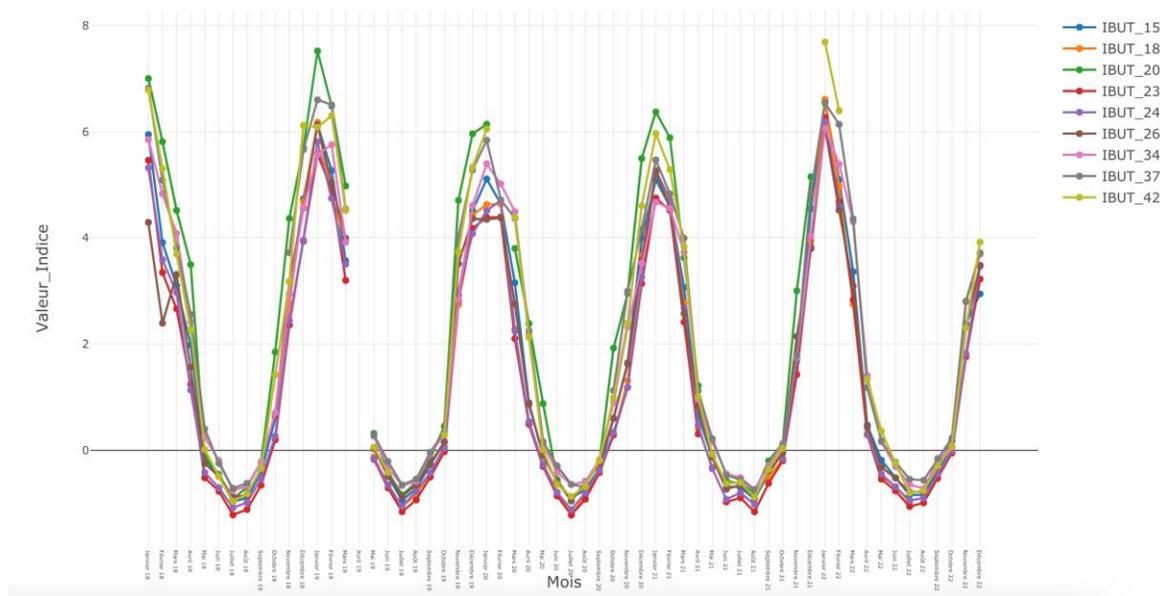


Figure 6 : Valeurs mensuelles de l'IBUT, de 2018 à 2022, pour les neuf stations

Visuellement tout d'abord, il est clair que l'indice fait bien ressortir les variations de rigueur hivernale selon les mois, et ce pour toutes les stations. Les valeurs maximales sont atteintes entre décembre et mars, avec quasi-systématiquement des pointes en janvier et février.

Certains points sont manquants, ils correspondent aux mois pour lesquels les fichiers mensuels n'ont pas pu être construits. On y retrouve notamment le mois d'avril 2019, pour toutes les stations, qui n'a pas pu être exploité.

Des variations sont également bien présentes entre les stations, et exploitables : les stations SMRF-20 (Rouyn-Noranda), SMRF-42 (Saguenay) et SMRF-37 (Manic-5) ont les hivers les plus rigoureux d'après cet échantillon. A contrario, la station SMRF-23 (Sainte-Thérèse) semble parmi les plus clémentes.

Enfin, il est possible de comparer les saisons hivernales entre elles : les saisons hivernales 2018/2019 et 2021/2022 semblent avoir été les plus rigoureuses, tandis que les saisons hivernales 2019/2020 et 2020/2021 ont été plus clémentes. L'indice, par sa structure continue et lisse, ne semble cependant peut-être pas assez fin pour repérer les variations subtiles des données d'entrée.

5.4.3 Construction de l'Indice basé sur des Catégories d'Événements Météorologiques (ICEM)

Comme vu précédemment, l'indice ontarien est construit comme somme de six variables catégorielles : la composante de neige (P1'), la composante de glace sur la route (P2'), la composante de pluies avec faibles températures (P3'), la composante de poudrierie (P4'), la composante de séries de jours froids (P5') et la composante d'ajustement pour temps chaud (P6').

La composante de neige P1' est elle-même divisée en trois seuils : P1'_1 = 0,5 pour une faible quantité de neige (de 0,2 à 1,9 cm), P1'_2 = 1 pour une quantité de neige modérée (de 1,91 à 4,9 cm), P1'_3 pour une grande quantité de neige (plus de 4,91 cm).

La composante de glace sur la route P2' est elle-même divisée en deux seuils : P2'_1 = 0,3 pour une présence de glace intermédiaire (entre 25% et 70%) et P2'_2 = 0,8 pour une présence de glace élevée (plus de 70%).

La composante P6' est définie ici comme le pourcentage conservé de l'indice lorsque la condition de temps chaud est activée. Elle vaut ainsi 0,55 à l'origine.

Au total, neuf paramètres sont donc utilisés pour calculer l'indice ontarien. Le nonuplet originel est :

(P1'_1, P1'_2, P1'_3, P2'_1, P2'_2, P3', P4', P5', P6') = (0,5, 1, 1,3, 0,3, 0,8, 0,4, 0,5, 0,5, 0,55).

Dans la même idée que l'optimisation de l'indice polonais ci-dessus, l'objectif est d'optimiser ce nonuplet pour augmenter la valeur du R au carré, avec la somme des quantités de sel et d'abrasifs comme variable d'étude. Cette optimisation fournira la définition du nouvel indice ICEM. Comme l'indice de l'Ontario, son échelle de temps sera au jour, avec possibilité d'effectuer une sommation pour l'élargir à une période donnée (mois ou saison hivernale).

Pour le nonuplet d'origine, la valeur du R au carré est de 0,6501. Ce qui est déjà mieux que le R au carré maximal obtenu avec l'indice polonais, de 0,6208. Cela reflète les conclusions de la partie 5.3, selon lesquelles l'indice ontarien est mieux adapté que l'indice polonais.

Puisque les paramètres du nonuplet sont exclusifs, l'optimisation est effectuée successivement sur chacun des paramètres. Le calcul est fait manuellement à l'aide d'une boucle de code, toujours grâce au logiciel R.

Tableau 32 : Extrait du tableau d'analyse de sensibilité pour l'optimisation de l'indice de l'Ontario : variations selon P6'

P1'_1	P1'_2	P1'_3	P2'_1	P2'_2	P3'	P4'	P5'	P6'	R2
0,5	1,3	1,3	0,35	0,8	2,2	0,4	0,9	0,25	0,66026374
0,5	1,3	1,3	0,35	0,8	2,2	0,4	0,9	0,2	0,66019974
0,5	1,3	1,3	0,35	0,8	2,2	0,4	0,9	0,3	0,66019035
0,5	1,3	1,3	0,35	0,8	2,2	0,4	0,9	0,15	0,66000145
0,5	1,3	1,3	0,35	0,8	2,2	0,4	0,9	0,35	0,65997659
0,5	1,3	1,3	0,35	0,8	2,2	0,4	0,9	0,35	0,65997659
0,5	1,3	1,3	0,35	0,8	2,2	0,4	0,9	0,1	0,65967205
0,5	1,3	1,3	0,35	0,8	2,2	0,4	0,9	0,1	0,65967205
0,5	1,3	1,3	0,35	0,8	2,2	0,4	0,9	0,4	0,65961959
0,5	1,3	1,3	0,35	0,8	2,2	0,4	0,9	0,4	0,65961959
0,5	1,3	1,3	0,35	0,8	2,2	0,4	0,9	0,05	0,65921481
0,5	1,3	1,3	0,35	0,8	2,2	0,4	0,9	0,45	0,65911659
0,5	1,3	1,3	0,35	0,8	2,2	0,4	0,9	0	0,65863306
0,5	1,3	1,3	0,35	0,8	2,2	0,4	0,9	0,5	0,65846501
0,5	1,3	1,3	0,35	0,8	2,2	0,4	0,9	0,55	0,65766237
0,5	1	1,3	0,3	0,8	0,4	0,5	0,5	0,55	0,65013141

Le tableau 34 est un extrait du tableau de l'analyse de sensibilité, avec ici l'étude en fonction de P6' et le classement selon la valeur du R au carré associée. La ligne inférieure en orange correspond au nonuplet originel, avec un R au carré associé de 0,6501.

La ligne supérieure en jaune correspond à la combinaison optimale après analyse de sensibilité sur P6' (et donc sur les neuf paramètres puisque chacun d'entre eux a été optimisé successivement auparavant, en finissant par P6').

Ainsi, le nonuplet final optimisé est :

(P1'_1f, P1'_2f, P1'_3f, P2'_1f, P2'_2f, P3'f, P4'f, P5'f, P6'f) = (0,5, 1,3, 1,3, 0,35, 0,8, 2,2, 0,4, 0,9, 0,25).

Pour cette combinaison, le R au carré vaut 0,6603, soit une hausse de 0,6603 - 0,6501 = 0,0102 après optimisation.

Plusieurs constats découlent de ce résultat :

- Le seuil intermédiaire de la composante de neige (P1'_2) est inutile, il est donc enlevé de l'indice optimisé.
- Le seuil supérieur de la composante de glace sur la route (P2'_2) ne s'active jamais dans les données expérimentales étudiées, il est donc également inutile et enlevé de l'indice optimisé.
- La composante de pluie avec faibles températures (P3') a fortement augmenté après optimisation : elle est multipliée par 5,5. Cela traduit un impact bien plus fort des conditions de pluies verglaçantes sur les opérations au Québec.
- Le raisonnement est similaire, bien que plus léger, pour la composante de séries de jours froids (P5'). Elle est multipliée par 1,8.
- Enfin, la composante d'ajustement pour temps chaud (P6') a diminué de 0,55 à 0,25. Ce qui signifie qu'en cas de « temps chaud », tel que défini par l'indice, la valeur résultante est plus réduite (baisse finale de 75% contre une baisse initiale de 45%).

Il est décidé de ne pas modifier les valeurs des seuils de composantes car il est supposé que des hypothèses météorologiques pertinentes y aient été faites dans le cadre de l'élaboration de l'indice de l'Ontario (des éléments également repris lors du développement de l'indice de l'INRS).

En conclusion, la formule finale proposée pour l'ICEM est :

Tableau 33: Définition de l'ICEM

Composante météorologique	Seuils des composantes	Score
Neige	Faible quantité de neige (de 0,2 à 1,9 cm)	0,5
	Quantité de neige modérée ou élevée (plus de 1,91 cm)	1,3
Présence de glace sur la route	< 0,2 cm de chute de neige journalière, et entre 25 % et 70 % d'avertissement de présence de glace sur la route.	0,35
Pluie avec faibles températures	Chute de neige journalière < 0,2 cm, Conditions pour présence de glace non remplies, Chute de pluie journalière ≥ 0,4 mm, Température minimale inférieure à -0,2°C.	2,2
Poudrierie	Précipitations journalières < 0,2 mm, Conditions pour présence de glace non remplies, Conditions pour pluie avec faibles températures non remplies, Vitesse du vent ≥ 15 km/h, Accumulation de neige pendant les trois jours précédents ≥ 5 cm.	0,4

Composante météorologique	Seuils des composantes	Score
Séries de jours froids	Précipitations journalières < 0,2 mm, Conditions pour présence de glace non remplies, Conditions pour pluie avec faibles températures non remplies, Conditions pour poudrière non remplies, Température maximale des trois derniers jours, inférieure à -12°C.	0,9
Facteur d'ajustement pour temps chaud	Si AU MOINS UNE des composantes météorologiques a été rencontrée ET que la température moyenne pour la période de 6 jours centrée sur le jour pour lequel le score est calculé est supérieure à -1°C.	- 75 % retiré au score journalier

5.4.4 Expérimentation de l'indice ICEM

Voici ci-dessous un graphique représentant les valeurs mensuelles de l'ICEM, pour les cinq années d'étude et les neuf stations superposées.

Les interprétations y sont globalement similaires avec celles de l'IBUT : cela prouve que les deux indices sont cohérents entre eux. Il y a cependant des différences notables.

D'abord, l'indice ICEM fait lui aussi bien ressortir les variations de rigueur hivernale selon les mois, et ce pour toutes les stations. Les valeurs les plus élevées sont ici également atteintes entre décembre et mars, avec souvent des pointes en janvier et février.

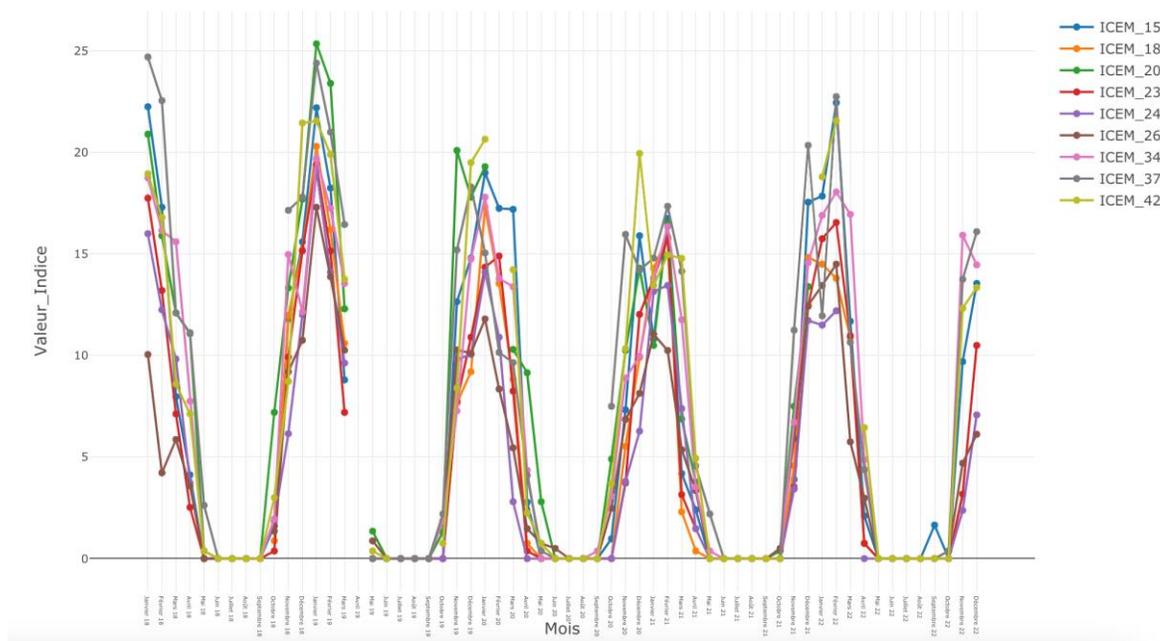


Figure 7 : Valeurs mensuelles de l'ICEM, de 2018 à 2022, pour les neuf stations

On retrouve des variations similaires entre les saisons hivernales à celles constatées avec l'ICEM : les saisons 2018/2019 et 2021/2022 semblent avoir été les plus rigoureuses, tandis que les saisons 2019/2020 et 2020/2021 ont été plus clémentes. C'est même la saison 2018/2019 qui se démarque avec un mois de janvier 2019 qui semble avoir été particulièrement intense.

Une nouvelle fois, certains points sont manquants, ils correspondent aux mois pour lesquels les fichiers mensuels n'ont pas pu être construits. Ce sont les mêmes mois que ceux manquants pour l'IBUT.

On retrouve des tendances similaires entre les stations, que ce soit avec l'ICEM ou l'IBUT : les stations SMRF-20 (Rouyn-Noranda), SMRF-42 (Saguenay) et SMRF-37 (Manic-5) se retrouvent parmi les plus rigoureuses. A contrario, la station SMRF-23 (Sainte-Thérèse) semble à nouveau parmi les plus clémentes.

L'ICEM apparaît cependant comme moins « lissé » que l'IBUT, ce qui est logique pour plusieurs raisons. Déjà, il est construit comme une somme de seuils discrets et perd donc de la continuité par rapport à l'IBUT. Ensuite, il est composé de beaucoup plus de composantes météorologiques distinctes. Cela fait alors du sens que les différences soient plus marquées. Et entre les stations, le fait que la plupart des composantes calculées soient localisées entraîne une variation plus grande entre les stations pour de mêmes mois. Ce n'est pas forcément préjudiciable, au contraire c'est pertinent comme on l'a vu avec les corrélations.

On remarque également que, par construction l'indice ICEM stagne sur un plateau nul les mois d'été, contrairement à l'IBUT qui reste continu dans les valeurs négatives. L'ICEM est d'ailleurs toujours positif ou nul.

En résumé, on peut dire que l'ICEM est plus sensible que l'IBUT, et notamment plus adapté aux réalités locales.

5.5 Validation avec les données municipales de Pointe-Claire

Pour finir, la dernière partie du projet consiste à analyser dans quelles mesures ces deux nouveaux indices : l'IBUT et l'ICEM, sont applicables à des réalités plus locales, à l'échelle municipale, et à quel point les corrélations sont encore efficaces avec les nouvelles données opérationnelles fournies au cas par cas. La ville de Pointe-Claire s'est portée volontaire pour transmettre de telles données à l'équipe de recherche.

Les données de Pointe-Claire utilisables ici pour analyser la corrélation sont celles de deux saisons hivernales : 2018-2019 et 2019-2020. La seule grandeur exploitable est le « nombre de tronçons réalisés », que nous assimilerons au nombre d'opérations, puisqu'il n'y a pas d'informations sur les durées des opérations, ni sur les quantités de produits épandues, ni sur une autre variable qui ferait du sens pour étudier la corrélation.

Ces données de nombres d'opérations sont réparties en quatre secteurs : respectivement appelés : « Bord du Lac », « Brunswick », « Saint-Jean » et « Sources ».

Voici un extrait de la structure des données fournies sur le nombre d'opérations par la ville de Pointe-Claire :

Tableau 34 : Structure des données opérationnelles sur le nombre d'opérations de la ville de Pointe-Claire

Date de Début	Activité	Nombre de Tronçon Réalisés
2019-11-12	Déblaiement des Trottoirs Est	41
2019-11-12	Déblaiement des Trottoirs Ouest	46
2019-11-12	Déblaiement des Rues Est	102
2019-11-12	Déblaiement des Rues Ouest	105
2019-11-12	Sel Rues	53
2019-11-13	Soufflage sur les Terrains	70
2019-11-13	Sel Trottoirs Est	41
2019-11-13	Sel Trottoirs Ouest	46
2019-11-13	Sel Rues	53
2019-11-16	Sel Rues	53
2019-11-16	Sel Trottoirs Est	41
2019-11-16	Sel Trottoirs Ouest	46
2019-11-20	Sel Rues	53
2019-11-20	Déblaiement des Rues Ouest	105
2019-11-20	Déblaiement des Rues Est	102
2019-11-28	Sel Trottoirs Est	41
2019-11-28	Sel Trottoirs Ouest	46
2019-11-28	Sel Rues	53

Cet extrait représente le nombre d'opérations pour un des quatre secteurs, durant le mois de novembre 2019. Pour obtenir notre variable d'étude, le nombre d'opérations mensuel, nous sommes ces nombres pour chaque mois et chacun des quatre secteurs.

Ensuite, la station MTMD la plus proche de Pointe-Claire est celle de Sainte-Thérèse (SMRF-23), associée à sa station Environnement Canada de l'Aéroport International Montréal-Trudeau. On va alors pouvoir étudier la corrélation entre les valeurs ICEM et IBUT de la station SMRF-23 pour les mois de 2018 à 2020 d'une part, et le nombre d'opérations mensuelles réalisées par la municipalité de Pointe-Claire d'autre part.

Voici un tableau résumant ces valeurs :

Tableau 35 : Valeurs de l'indice ICEM, de l'indice IBUT et du nombre d'opérations

Mois	Valeur ICEM	Valeur IBUT	Nombre d'opérations
Novembre 2018	9,925	2,359	2843+1793+2336+2416 = 9 388
Décembre 2018	15,15	3,935	1237+1111+1220+1163 = 4 731
Janvier 2019	19,4	5,583	5066+4644+6227+5653 = 21 590
Février 2019	15,15	4,904	3678+2586+2746+3590 = 12 600

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEL INDICE DE RIGUEUR HIVERNALE AU QUÉBEC

Mars 2019	7,2	3,200	324+638+897+708 = 2 567
Avril 2019	/	/	836+680+803+834 = 3 153
Novembre 2019	7,75	2,811	1454+1182+1367+1097 = 5 100
Décembre 2019	10,9	4,178	1918+1276+1800+1359 = 6 353
Janvier 2020	14,35	4,385	2741+2752+1635+1444 = 8 572
Février 2020	14,9	4,393	2935+2693+2666+2296 = 10 590
Mars 2020	8,25	2,103	62+0+0+70 = 132
Avril 2020	0,375	0,490	/

Le mois d'avril 2019 est enlevé puisque les fichiers mensuels n'y sont pas disponibles comme expliqué dans les parties précédentes.

Le mois d'avril 2020 est enlevé puisqu'il n'y a pas eu d'opérations répertoriées par la municipalité de Pointe-Claire.

Dix triplets sont donc utilisés : la valeur de l'ICEM, la valeur de l'IBUT et le total du nombre d'opérations de Pointe-Claire, le tout pour chaque mois de novembre 2018 à mars 2019 et de novembre 2019 à mars 2020.

L'indice de corrélation entre les valeurs de l'ICEM et le nombre d'opérations vaut 0,816. L'indice de corrélation entre les valeurs de l'IBUT et le nombre d'opérations vaut 0,774.

Les deux corrélations restent bonnes, mais moins qu'avec les données opérationnelles du Ministère. Cela peut notamment s'expliquer par le faible volume de l'échantillon (seulement dix valeurs). L'ICEM reste meilleur que l'IBUT. Ce raisonnement est une introduction et pourra bien évidemment être élargi à de plus larges volumes, à d'autres sources de données de municipalités, et à des méthodologies approfondies.

6 DISCUSSION ET CONCLUSION

Dans cette section, nous faisons un bref rappel des différents éléments contributifs du projet, puis nous en énonçons les limitations, avant de passer à quelques recommandations.

6.1 Contributions

Dans ce projet, nous proposons deux nouveaux indices de rigueur hivernale (IRH) pour le Québec, soit un basé uniquement sur les températures (IBUT) et un autre basé sur les catégories d'événements météorologiques (ICEM). La revue de littérature a permis de constater l'existence de plusieurs IRH dans les milieux nordiques, principalement en Europe, dans le nord des États-Unis et au Canada. Ces IRH ont été développés au fil des ans pour répondre à divers besoins, le principal étant de pouvoir comparer les conditions météorologiques d'un hiver à l'autre afin de vérifier si les ressources engagées sont adéquates en fonction de ces variations.

Les travaux ont permis de structurer des données reçues de nos partenaires, principalement le MTMD. D'abord, le MTMD a fourni des données historiques de 9 de ses stations météorologiques, pour une période de 5 ans. Un traitement de ces données a été proposé afin de pouvoir les mettre en forme et les utiliser dans le calcul des IRH. Cela a demandé notamment de normaliser certaines données provenant de capteurs de nature différentes et d'identifier les bonnes colonnes à utiliser dans les données. Il a également fallu tenir compte de certaines données manquantes, par la défectuosité des détecteurs ou carrément l'absence de certains détecteurs. Des données opérationnelles sur les ressources utilisées pour les opérations de viabilité hivernale ont également été fournies par le MTMD pour une période de 4 ans ; elles ont été intégrées au projet (nombre d'heures opérées, quantités de sels et d'abrasif épandues, nombre de sorties). De même, la ville de Pointe-Claire a fourni des données similaires. Enfin, nous avons mis en forme des données historiques d'Environnement Canada pour ajouter la pluviométrie (précipitations) aux données du MTMD.

Ces données ont été utilisées pour tester 6 IRH choisis pour leur correspondance avec les données disponibles et leur facilité de calcul en ce contexte : Pennsylvanie, Ontario, INRS, SHRP, Pologne, Illinois. Les valeurs de ces IRH ont été calculés pour les mois correspondants à la période disponible des données opérationnelles de viabilité hivernale. Des tests de corrélation entre les IRH et les ressources engagées par les directions générales territoriales du MTMD ont permis de constater que l'indice de la Pologne, basé uniquement sur la température de l'air, et l'indice de l'Ontario, un indice quotidien basé sur des catégories d'événements météorologiques (et ramené au mois), offrent les meilleures corrélations et ont donc été retenus pour le développement des IRH du projet.

Ces IRH sont à la base de la création de l'IBUT, l'indice basé uniquement sur la température, qui a été recalibré à l'aide d'une régression linéaire en fonction des données québécoises, et l'ICEM, l'indice basé sur les catégories d'événements météorologiques, qui a été adapté pour donner suite à un design expérimental de variation des coefficients afin de déterminer la

combinaison qui donne la meilleure corrélation avec les ressources engagées par le MTMD. Dans les deux cas, nous n'avons pas remis en question les variables utilisées (température, vent, précipitations) puisque nous considérons qu'elles ont été validées par des experts en météorologie dans les projets précédents. Cependant, dans l'ICEM, nous proposons une simplification de certaines catégories.

L'IBUT et l'ICEM ont ensuite été appliqués à des données opérationnelles municipales exogènes : les données de Pointe-Claire. Malgré le faible volume de l'échantillon et les variables recensées limitées, les résultats restent concluants et cohérents. Ce procédé d'application des nouveaux indices aux données de villes québécoises pourra facilement être étendu à plus grande échelle, dès lors que des données opérationnelles seront disponibles.

6.2 Limitations

La principale limitation liée à ce projet est le fait d'avoir considéré que les ressources engagées en viabilité hivernale lors de la période examinée (2018-2022) reflètent fidèlement les conditions météorologiques enregistrées (connaissance « parfaite » de la situation et adéquation des ressources). Nous considérons que le fait d'avoir utilisé 9 stations différentes, situées aux quatre coins du Québec, permet d'amoindrir de possibles divergences entre les règles d'opérations des différentes directions territoriales.

Une autre limitation concerne les données sur les précipitations. En effet, puisque les stations météorologiques du MTMD sont dépourvues de pluviomètres, nous avons utilisé des données d'Environnement Canada collectées à une certaine distance des stations du MTMD, ce qui peut occasionner des différences locales au niveau des précipitations. De même, nous avons dû estimer les chutes de neige en utilisant les chutes de liquide et la température de l'air, puisque les quantités de neige tombée ne sont plus disponibles à plusieurs endroits.

Dû à la nature des données météo du MTMD et d'Environnement Canada, nous avons dû proposer certains ajustements pour les données manquantes, les capteurs défectueux ou d'autres anomalies constatées. Cela pourrait avoir apporté quelques divergences au niveau des résultats, mais nous considérons que la quantité de mois et de stations amoindrit ce risque.

6.3 Perspectives et recommandations

Ces travaux ont permis de constater certains éléments ayant matière à amélioration.

D'abord, la mise en forme des données a demandé beaucoup de manipulations ad hoc, de simplifications, de lissages et de recalculs. Dans le but de pouvoir calculer les IRH de façon automatique pour chacune des stations météorologiques, il faudrait automatiser ce processus de traitement des données en établissant des règles informatiques claires qui permettrait de générer les ensembles de données nécessaires. De même, l'automatisation du processus permettrait d'obtenir de facto une grande quantité de valeurs d'IRH pour toutes les stations, au fil des années, ce qui permettrait également de peaufiner l'indicateur au besoin.

À cet effet, il serait souhaitable que le MTMD équipe toutes ses stations météorologiques de pluviomètres afin de collecter in situ cette mesure nécessaire au calcul de l'ICEM, sans compter que cette donnée serait potentiellement utile à d'autres fins au Ministère. Le cas échéant, en attendant leur mise en place, il faudrait examiner la possibilité que le MTMD acquiert automatiquement ces données d'un fournisseur qui puisse leur fournir les quantités de précipitations aux lieux précis des stations. De plus, nous avons constaté lors de ce travail que le MTMD ne dispose pas de station météorologique sur l'île de Montréal, ce qui ne permet pas de calculer un IRH spécifique à cette ville, où d'importantes ressources du MTMD en viabilité hivernale sont pourtant utilisées.

La mise en place d'un tableau de bord actualisé diffusant les IRH au sein du Ministère et au grand public permettrait d'autant plus de valoriser les données historiques récoltées dans les stations météorologiques. L'utilisation à long terme des IRH permettrait également de pouvoir suivre l'évolution des conditions météorologiques à travers le Québec, dans le contexte des changements climatiques.

Nous recommandons au MTMD de mettre en œuvre les moyens lui permettant de pouvoir calculer l'ICEM de façon automatique et transparente. Lorsque cela est possible, l'indice ICEM est conseillé pour l'implantation et l'harmonisation entre les différents acteurs, car il est plus complet et présente des résultats plus pertinents. Si l'implantation de l'ICEM n'est pas possible, notamment pour des raisons de manque de données, l'indice IBUT est utilisable en second recours.

7 RÉFÉRENCES

- ANDREY, J., LI, J., MILLS, B., 2001. A winter index for benchmarking winter road maintenance operations on Ontario highways. *80th Annual Meeting of the Transportation Research Board*.
- ANDREY, J., MATTHEWS, L., 2012. Winter severity index (WSI) for road salt management in Canada. Submitted to Environment Canada.
- BLACKBURN, R., BAUER, K., AMSLER Sr., D., BOSELLY, S., MCELROY, A., 2004. NCHRP Report 526: Snow and Ice Control: Guidelines for Materials and Methods to Mitigate Environmental Impacts. *Transportation Research Board of the National Academies*.
- BLINCOE, L. J., MILLER, T. R., ZALOSHNIJA, E., LAWRENCE, B. A., 2015. The economic and societal impact of motor vehicles crashes. Report N° DOT HS 812 013.
- BOSELLY, S. E., THORNES, J. E., ULBERG, C., 1993. Road Weather Information Systems Volume 1: Research Report. Report No. SHRP-H-350.
- BOUSTEAD, B., HILBERG, S., SHULSKI, M., HUBBARD, K., 2015. The Accumulated Winter Season Severity Index (AWSSI). *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 54.
- CONGER, S. M., 2005. NCHRP Synthesis 344: Winter Highway Operations. *Transportation Research Board of the National Academies*.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 2022. Données historiques, Conditions météorologiques et climatiques passées.
- FARR, W. C., STURGES, L. J., 2012. Utah winter severity index: Phase 1. Report No. UT-12.12, Utah Department of Transportation Weather Operations.
- FAY, L., SHI, X., HUANG, J., 2013. NCHRP Synthesis 449: Strategies to Mitigate the Impacts of Chloride Roadway Deicers on the Natural Environment. *Transportation Research Board of the National Academies*.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA), 2016. Road Weather Management Program, Best Practices for Road Weather Management.
- GUSTAVSSON, T., 1996. Test of indices for classification of winter climate. *Meteorological Applications*. 3. 215-222.
- HAMMAMI, D., GIROUX, J.-X., CHEBANA, F., 2014. Développement d'un indice de rigueur hivernale pour le Québec. Rapport final. Institut national de la recherche scientifique. Centre Eau, Terre et Environnement. À l'attention de : Service de l'exploitation, Direction du soutien aux opérations, ministère des Transports du Québec.
- HULME, M., 1982. A new winter index and geographical variations in winter weather. *Journal of Meteorology*, 7, 294-300.
- MAHLE, A.H., ROGSTAD, G., 2002. Noriks – a winter index for Norwegian conditions.
- MARQUIS, B., NOUHAN, V., COLSON, S., PAYEUR, J., 2009. A Winter Severity Index for the State of Maine. Technical Report 09-1.

MATTHEWS, L., ANDREY, J., MINOKHIN, I., & PERCHANOK, M., 2017. Operational Winter Severity Indices in Canada – From Concept to Practice.

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*, Volume 22.

MCCULLOUGH, B., BELTER, D., KONIECZNY, T., MCCLELLAN, T., 2004. Indiana Winter Severity Index. *Transportation Research Circular Sixth International Symposium on Snow Removal and Ice Control Technology*.

NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION (NHTSA), 2016. New NHTSA Study Shows Motor Vehicle Crashes Have 836\$ Billion Economic and Societal Impact on U.S. Citizens.

NIXON, W., QIU, L., 2005. Developing a storm severity index. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1911, 143-148.

PACZOS, S., 1985. The problem of winter classification in the light of various thermal criteria.

PERMANENT INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ROAD CONGRESSES (PIARC), 2006. Base de données sur la neige et le verglas. Comité technique AIPCR 3.4 Viabilité hivernale.

PERMANENT INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ROAD CONGRESSES (PIARC), 2010. Base de données sur la neige et le verglas. Comité technique B5 de l'AIPCR sur la viabilité hivernale.

PERMANENT INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ROAD CONGRESSES (PIARC), 2014. Base de données sur la neige et le verglas. Comité technique 2.4 Entretien hivernal.

PISANO, P. A., GOODWIN, M. A., ROSETTI, M. A., 2008. U.S. Highway Crashes in Adverse Road Weather Conditions. *Proceedings of the 88th Annual American Meteorological Society Meeting*, 20-24

ROAD WEATHER MANAGEMENT PROGRAM (RWMP), 2016. How Do Weather Events Impact Roads?

STRONG, C., SHVETSOV, Y., SHARP, J., 2005. Development of roadway weather severity index. Final Technical Report, U.S. Department of Transportation.

SUGGETT, J., HADAYEGHI, A., MILLS, B., ANDREY, J., & LEACH, G., 2006. Development of winter severity indicator models for Canadian winter road maintenance. *2006 Annual Conference of the Transportation Association of Canada: Transportation Without Boundaries, TAC/ATC 2006*.

SZYGA-PLUTA, K., 2022. Changes in snow cover occurrence and the atmospheric circulation impact in Poznań (Poland). *Theor Appl Climatol* 147, 925-940.

VENALAINEN, A., 2001. Estimation of road salt use based on winter air temperature. *Meteorological Applications*. 8. 333-338.

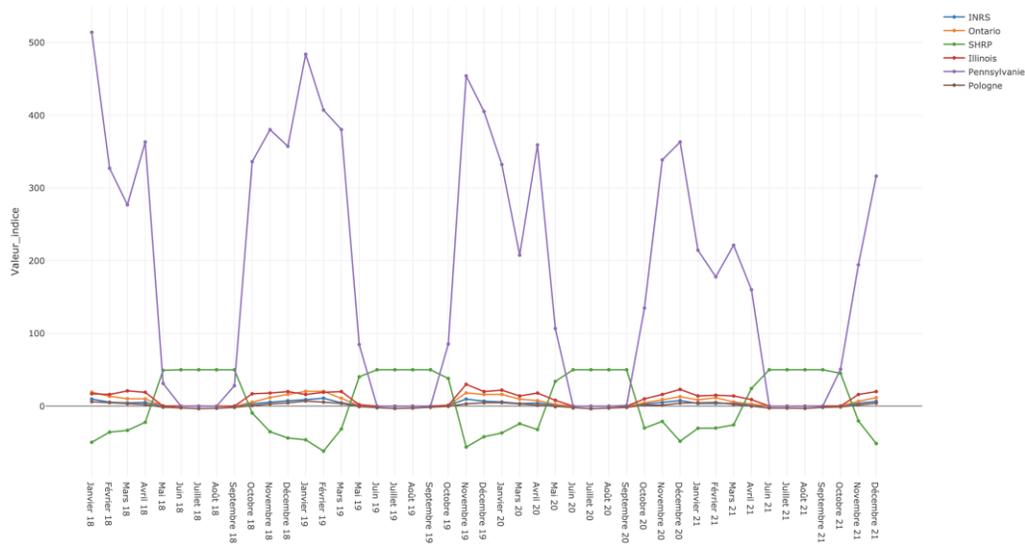
VOLDBORG, H., KNUDSEN, F., 1988. A winter index based on measured and observed road weather parameters. *4th International Conference on Weather and Road Safety*.

WALKER, C., STEINKRUGER, D., GHOLIZADEH, P., HASANZEDAH, S., ANDERSON, M., ESMAEILI, B., 2019a. Developing a Department of Transportation Winter Severity Index. *Papers in the Earth and Atmospheric Sciences*. 631.

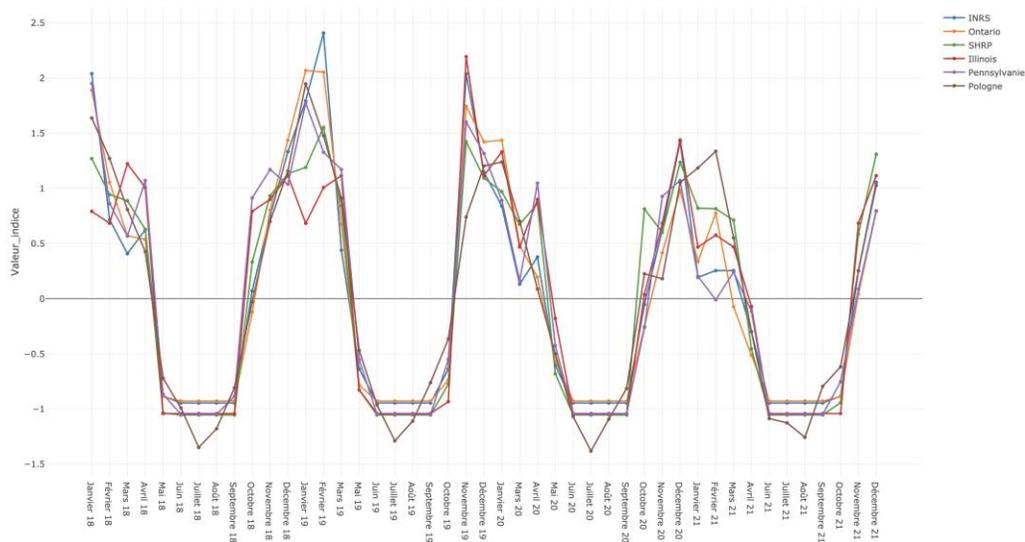
WALKER, C. L., HASANZADEH, S., ESMAEILI, B., ANDERSON, M. R., & DAO, B., 2019b. Developing a winter severity index: A critical review. *Cold Regions Science and Technology*, 160, 139-149.

8 ANNEXES

8.1 Graphiques bruts puis normalisés des résultats obtenus pour les indices, pour les stations SMRF-20, SMRF-23, SMRF-24, SMRF-26, SMRF-34, SMRF-37 et SMRF-42, et pour la période de janvier 2018 à décembre 2022

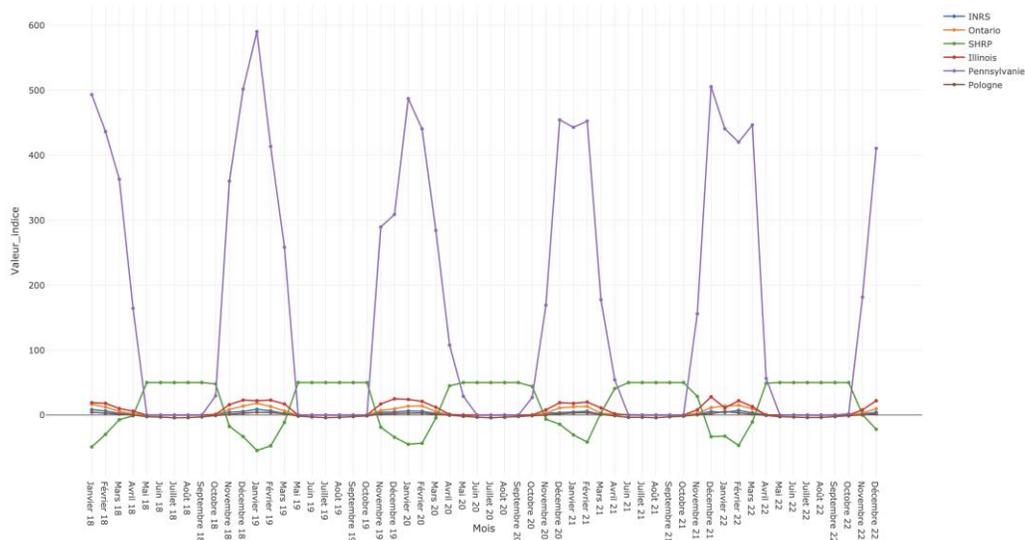


Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-20 (valeurs brutes)

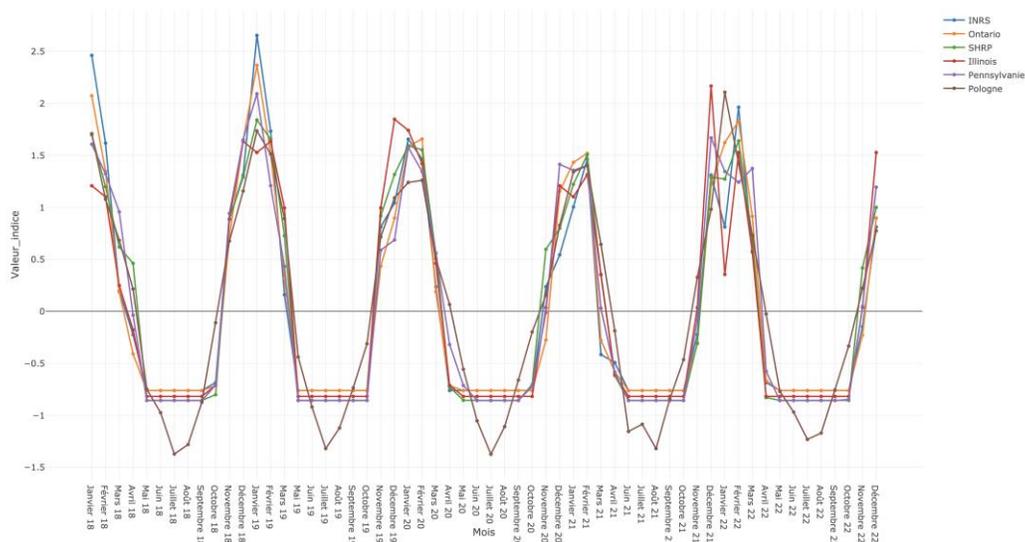


Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-20 (valeurs normalisées)

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEL INDICE DE RIGUEUR HIVERNALE AU QUÉBEC

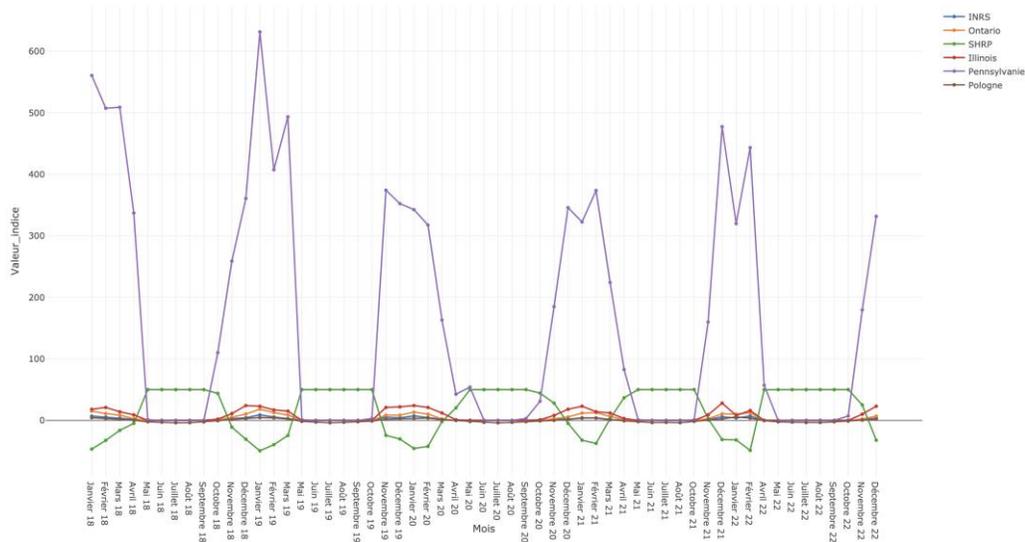


Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-23 (valeurs brutes)

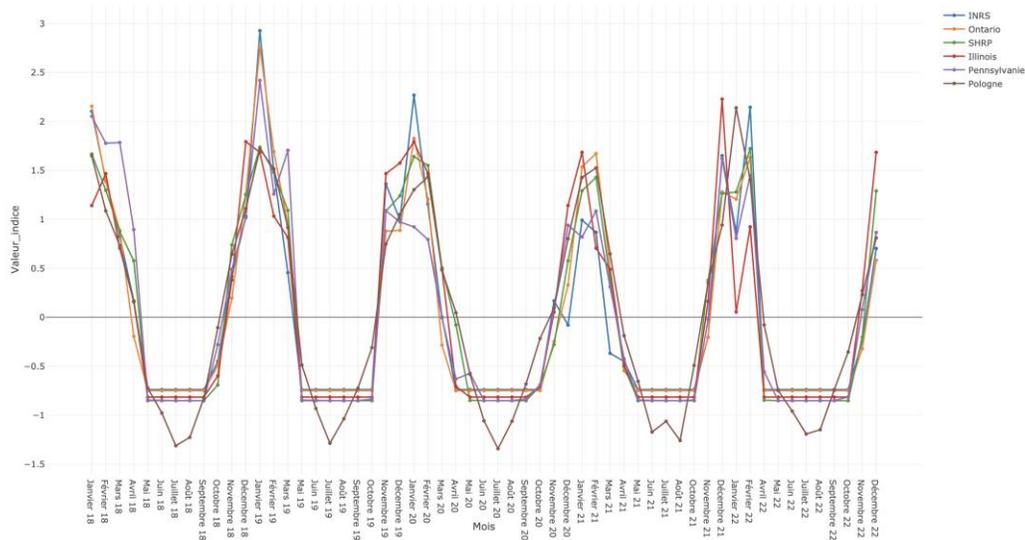


Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-23 (valeurs normalisées)

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEL INDICE DE RIGUEUR HIVERNALE AU QUÉBEC

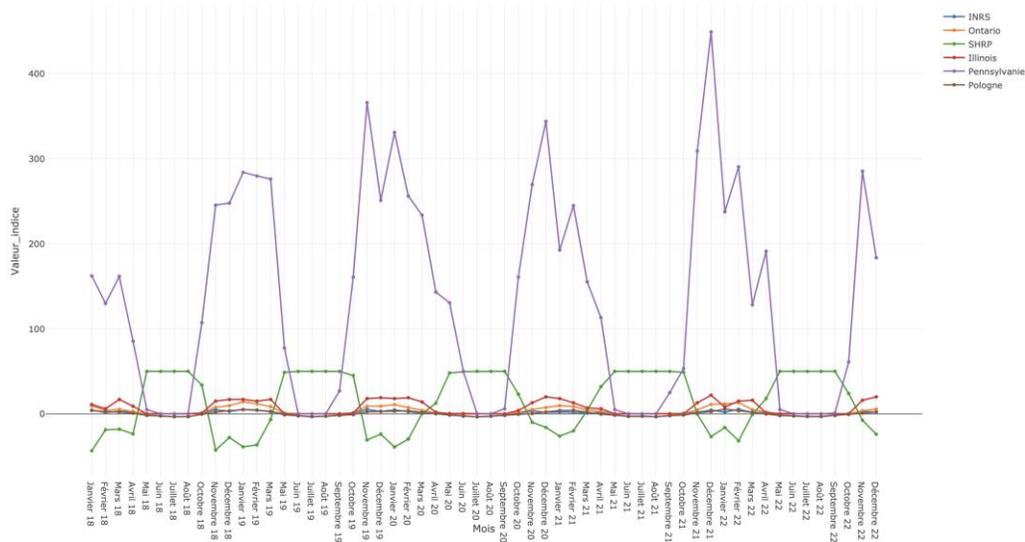


Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-24 (valeurs brutes)

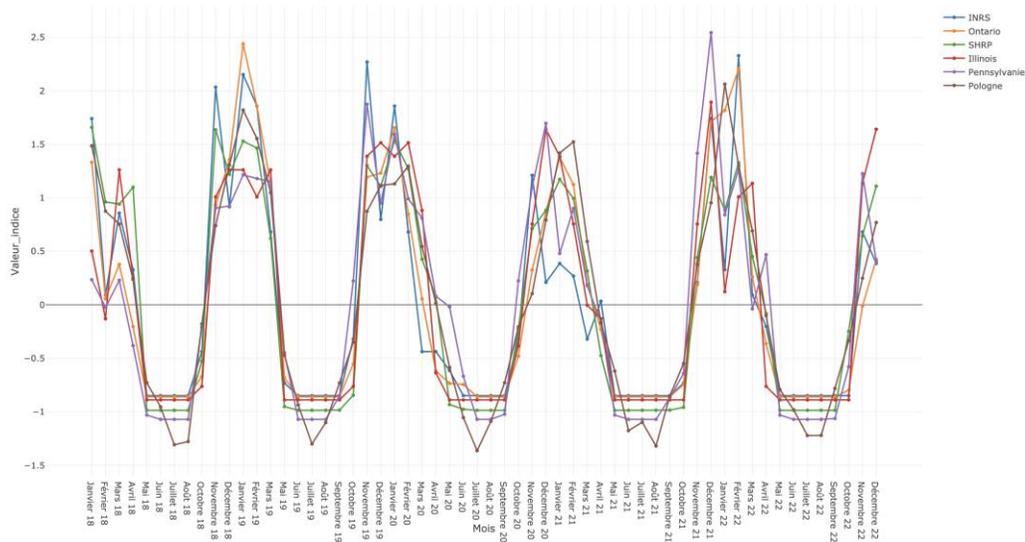


Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-24 (valeurs normalisées)

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEL INDICE DE RIGUEUR HIVERNALE AU QUÉBEC

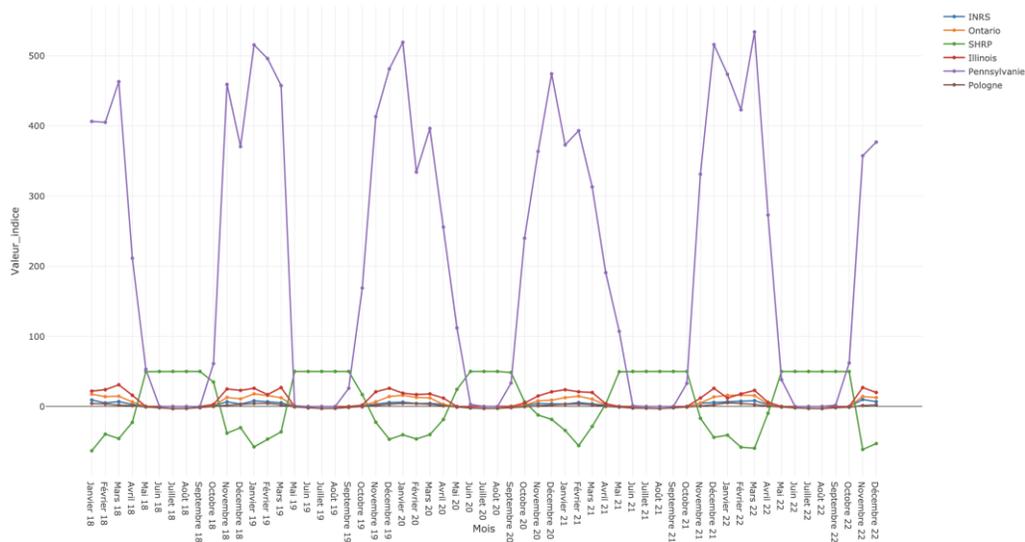


Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-26 (valeurs brutes)

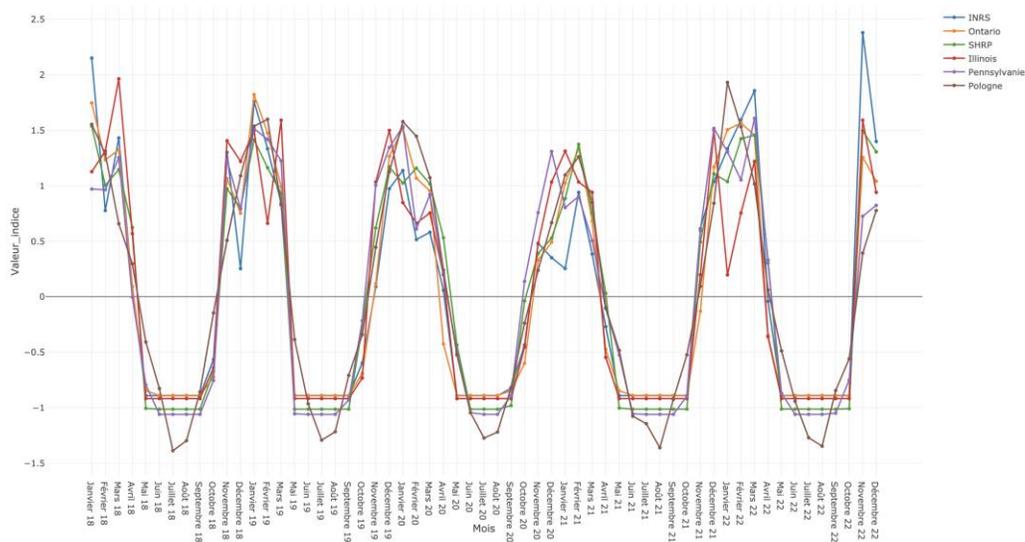


Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-26 (valeurs normalisées)

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEL INDICE DE RIGUEUR HIVERNALE AU QUÉBEC

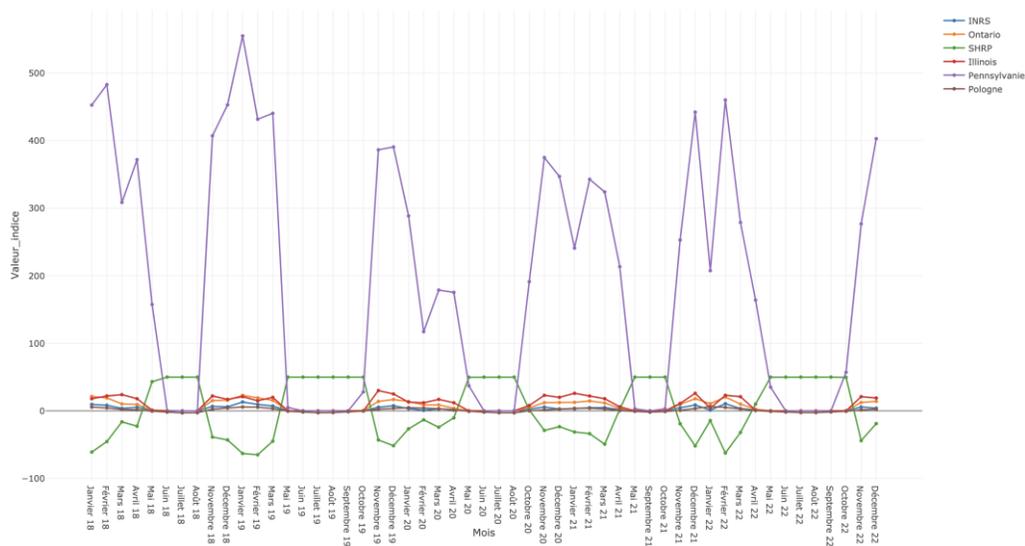


Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-34 (valeurs brutes)

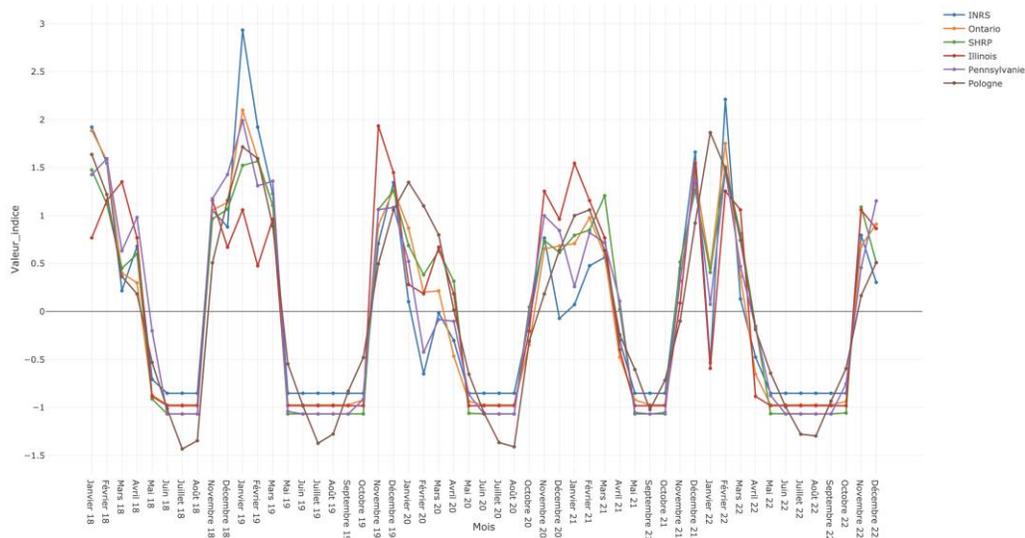


Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-34 (valeurs normalisées)

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEL INDICE DE RIGUEUR HIVERNALE AU QUÉBEC

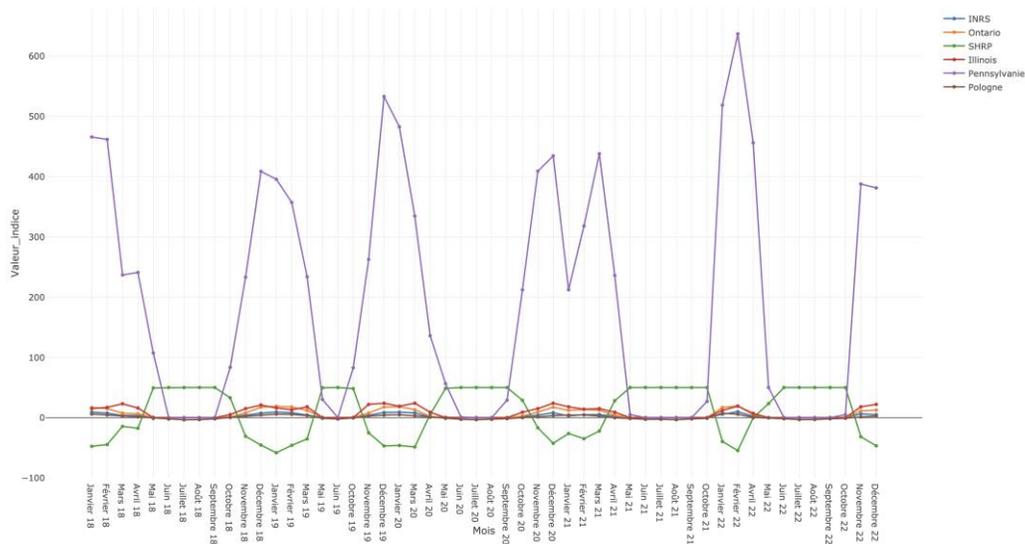


Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-37 (valeurs brutes)

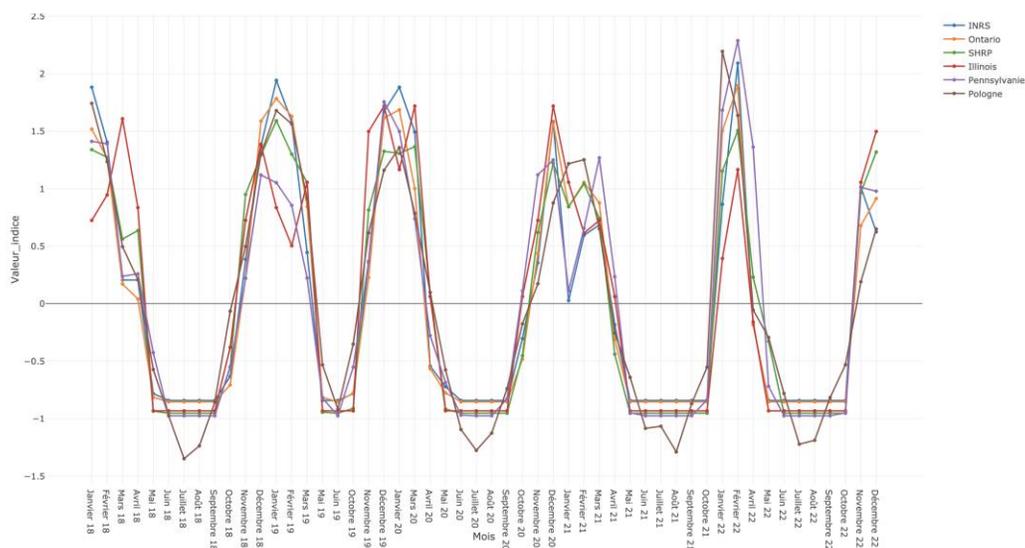


Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-37 (valeurs normalisées)

DÉVELOPPEMENT D'UN NOUVEL INDICE DE RIGUEUR HIVERNALE AU QUÉBEC



Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-42 (valeurs brutes)



Valeurs des indices de rigueur expérimentés, pour la station SMRF-42 (valeurs normalisées)

8.2 Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles des centres de services associés aux stations

Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles du centre de services associé à la station SMRF-15

Indice	Station	nombre_operations	Total_duree_mn	Total_sel	Total_abrasifs
INRS	15	0,873	0,87	0,892	0,89
Ontario	15	0,879	0,914	0,923	0,923
SHRP	15	0,842	0,902	0,901	0,875
Illinois	15	0,73	0,812	0,827	0,769
Pennsylvanie	15	0,677	0,841	0,869	0,748
Pologne	15	0,869	0,931	0,897	0,923

Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles du centre de services associé à la station SMRF-18

Indice	Station	nombre_operations	Total_duree_mn	Total_sel	Total_abrasifs
INRS	18	0,893	0,766	0,803	0,6
Ontario	18	0,933	0,783	0,815	0,612
SHRP	18	0,89	0,772	0,777	0,533
Illinois	18	0,812	0,709	0,736	0,497
Pennsylvanie	18	0,83	0,655	0,673	0,472
Pologne	18	0,85	0,701	0,693	0,472

Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles du centre de services associé à la station SMRF-20

Indice	Station	nombre_operations	Total_duree_mn	Total_sel	Total_abrasifs
INRS	20	0,913	0,9	0,88	0,732
Ontario	20	0,922	0,91	0,869	0,765
SHRP	20	0,828	0,834	0,843	0,618
Illinois	20	0,74	0,759	0,818	0,42
Pennsylvanie	20	0,788	0,77	0,761	0,581
Pologne	20	0,88	0,869	0,787	0,806

Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles du centre de services associé à la station SMRF-23

Indice	Station	nombre_operations	Total_duree_mn	Total_sel	Total_abrasifs
INRS	23	0,937	0,885	0,936	0,959
Ontario	23	0,949	0,929	0,953	0,954
SHRP	23	0,938	0,897	0,921	0,934
Illinois	23	0,908	0,847	0,865	0,883
Pennsylvanie	23	0,948	0,927	0,929	0,925
Pologne	23	0,897	0,899	0,917	0,901

Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles du centre de services associé à la station SMRF-24

Indice	Station	nombre_operations	Total_duree_mn	Total_sel	Total_abrasifs
INRS	24	0,921	0,917	0,928	0,868
Ontario	24	0,95	0,926	0,923	0,919
SHRP	24	0,924	0,874	0,893	0,816
Illinois	24	0,849	0,776	0,815	0,719
Pennsylvanie	24	0,868	0,825	0,832	0,803
Pologne	24	0,941	0,903	0,903	0,883

Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles du centre de services associé à la station SMRF-26

Indice	Station	nombre_operations	Total_duree_mn	Total_sel	Total_abrasifs
INRS	26	0,784	0,787	0,801	0,789
Ontario	26	0,904	0,908	0,934	0,935
SHRP	26	0,911	0,92	0,893	0,906
Illinois	26	0,812	0,812	0,799	0,783
Pennsylvanie	26	0,65	0,646	0,661	0,657
Pologne	26	0,892	0,895	0,901	0,913

Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles du centre de services associé à la station SMRF-34

Indice	Station	nombre_operations	Total_duree_mn	Total_sel	Total_abrasifs
INRS	34	0,89	0,781	0,898	0,906
Ontario	34	0,939	0,901	0,924	0,964
SHRP	34	0,875	0,871	0,85	0,888
Illinois	34	0,849	0,877	0,81	0,841
Pennsylvanie	34	0,879	0,82	0,902	0,898
Pologne	34	0,918	0,893	0,892	0,945

Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles du centre de services associé à la station SMRF-37

Indice	Station	nombre_operations	Total_duree_mn	Total_sel	Total_abrasifs
INRS	37	0,747	0,788	0,734	0,731
Ontario	37	0,929	0,932	0,854	0,89
SHRP	37	0,875	0,874	0,758	0,833
Illinois	37	0,801	0,781	0,636	0,752
Pennsylvanie	37	0,849	0,859	0,763	0,82
Pologne	37	0,887	0,863	0,824	0,815

Corrélation entre la valeur des indices de rigueur hivernale et les données opérationnelles du centre de services associé à la station SMRF-42

Indice	Station	nombre_operations	Total_duree_mn	Total_sel	Total_abrasifs
INRS	42	0,885	0,905	0,895	0,883
Ontario	42	0,9	0,943	0,94	0,918
SHRP	42	0,911	0,929	0,928	0,898
Illinois	42	0,802	0,799	0,792	0,711
Pennsylvanie	42	0,608	0,687	0,674	0,677
Pologne	42	0,86	0,925	0,933	0,936