

**OPTIMISATION DES ZONES CLIMATIQUES HIVERNALES (ZCH) ET DU  
RÉSEAU DE STATIONS DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRES POUR LES  
DÉCIDEURS OPÉRATIONNELS EN ENTRETIEN HIVERNAL DU  
RÉSEAU ROUTIER DU MINISTÈRE DES TRANSPORTS (MTQ)**  
Projet R836.1

Chercheure principale  
**Nathalie Barrette**

Rédaction  
**Hicham El Hachemi**  
**Mireille Lajoie**

Département de géographie  
Faculté de foresterie, géographie et géomatique

Réalisé pour le compte de la direction générale de la gestion des projets routiers et de  
l'encadrement en exploitation, Ministère des Transports du Québec

Mars 2020

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports et a été financée par la Direction générale de la gestion des actifs routiers et de l'innovation.

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.

### **Principaux collaborateurs**

Nathalie Barrette, Professeure et responsable du projet, Département de géographie, Faculté de foresterie, géographie et géomatique

Hicham El Hachemi, Professionnel de recherche, Département de géographie, Faculté de foresterie, géographie et géomatique

Benoît Lalonde, Responsable de travaux pratiques et de recherche, Département de géographie, Faculté de foresterie, géographie et géomatique

Yves Brousseau, Professeur et Directeur des programmes de 1er cycle, Département de géographie, Faculté de foresterie, géographie et géomatique

Marie-Hélène Vandersmissen, Professeure et directrice de département, Département de géographie, Faculté de foresterie, géographie et géomatique

Mireille Lajoie, Auxiliaire de recherche, Département de géographie, Faculté de foresterie, géographie et géomatique

Jean Junior Desaulniers-Montenegro, Auxiliaire de recherche, Département de géographie, Faculté de foresterie, géographie et géomatique

## **SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS**

---

Dans le présent projet, deux objectifs principaux ont été achevés, y compris la détermination d'un nouveau découpage en zones climatiques hivernales (ZCH) suivant une approche scientifique et la proposition d'un cadre de planification pour déterminer l'emplacement optimal des futures stations météo-routières (SMR) sur le réseau routier du MTQ. L'examen de la littérature scientifique disponible a constitué une assise à l'atteinte de ces objectifs. Il a permis d'identifier les paramètres et variables à prendre en compte pour la réalisation de chacun des objectifs, ainsi que de choisir les approches méthodologiques à préconiser. Suite à l'examen de la littérature pour le premier objectif, aucune étude similaire à notre problématique n'a été identifiée, par contre certaines autres études dans la littérature scientifique utilisant des méthodes d'agrégation ont inspiré notre approche méthodologique. Pour le deuxième objectif, la littérature a révélé que l'implantation des SMR était un processus subjectif reposant uniquement sur un jugement personnel, par la suite certaines autorités routières ont senti le besoin de commencer par définir des méthodes objectives de sélection des sites de SMR qui tentent de quantifier et d'optimiser les connaissances détenues par le personnel de leurs entités. Plusieurs études suggèrent des modèles d'optimisation utilisant des données liées à l'historique des accidents hivernaux, aux débits de circulation et aux données climatiques.

Dans l'ensemble, ce travail a permis, au moyen d'une classification automatique, d'obtenir un zonage en agrégats homogènes en 87 classes, à partir de trois catégories de données à savoir des données météorologiques, physiques et géographiques. Ce zonage permet de décrire des agrégats homogènes à l'intérieur desquels le comportement est similaire vis-à-vis des paramètres considérés. La contiguïté des 87 classes démontre la très forte contrainte spatiale appliquée par l'algorithme utilisé. Le zonage final laisse apparaître des zones à faible variance intragroupe comparées à d'autres présentant une variabilité plus importante, tandis que le zonage initial en 12 classes permettait de retrouver les grandes caractéristiques régionales du réseau.

En ce qui est de la deuxième partie du projet, une méthodologie d'optimisation a été proposée pour rechercher les emplacements optimaux des SMR, dans le but de simplifier la prise de décision dans la planification du réseau des SMR. Dans un premier niveau d'analyse, 1356 emplacements candidats ont été triés en fonction de leurs valeurs de score dans un ordre décroissant. Le deuxième niveau a consisté à intégrer dans l'analyse les zones climatiques

hivernales (ZCH) définies lors de la première partie du projet. Ces ZCH ont été utilisées pour affiner les solutions optimales à partir du niveau supérieur en imposant une station météo-routière par ZCH et en examinant plus à fond en fonction de leurs valeurs de scores, ce qui permettra de garantir une bonne couverture spatiale du réseau des SMR.

Néanmoins, il existe un certain nombre de recommandations pratiques et de possibilités d'orientation future, découlant des objectifs du projet considérés à savoir :

- L'apport de l'expertise du personnel terrain du MTQ reste capital et ne doit pas être exclu à aucun moment du processus, que ce soit pour le zonage ou l'emplacement des futures stations météo-routières.
- La base de données dont dispose le MTQ et qui est alimentée principalement par le réseau de stations météo-routières déjà existant, nécessite un grand effort de consolidation pour la rendre exploitable.
- Le MTQ pourrait introduire des pondérations sélectionnées par des experts routiers et météorologiques du ministère qui reflètent leurs connaissances et leurs préférences pour planifier l'installation des futures SMR.
- À mesure qu'ils deviennent disponibles, d'autres critères de localisation peuvent être utilisés pour affiner le choix optimal des sites tel que la température de surface pour les critères climatiques et d'autres facteurs d'ordre financier tels que les coûts d'entretien hivernal des routes et les coûts de maintenance des SMR.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>I</b>
<b>GLOSSAIRE .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1. MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE.....</b>	<b>9</b>
<b>2. CHAPITRE 1. REVUE DE LITTÉRATURE .....</b>	<b>11</b>
2.1. REVUE DE LITTÉRATURE : OBJECTIF 1 .....	12
2.1.1. Méthode de recherche et critères d'inclusion.....	12
2.1.2. Résultats de la revue de littérature pour l'objectif 1 .....	15
2.2. REVUE DE LITTÉRATURE : OBJECTIF 2 .....	25
2.2.1. Méthode de recherche et critères d'inclusion.....	25
2.2.2. Résultats de la revue de littérature pour l'objectif 2 .....	29
2.3. CONCLUSION : REVUE DE LITTÉRATURE.....	44
<b>3. CHAPITRE 2 : DÉTERMINATION DES ZCH.....</b>	<b>46</b>
3.1. MÉTHODOLOGIE PRÉCONISÉE .....	47
3.1.1. Variables .....	48
3.1.2. Description des données.....	50
3.1.3. Analyse en composantes principales (ACP) .....	55
3.1.4. Agrégation.....	55
3.2. RÉSULTATS : DÉTERMINATION DES ZCH .....	59
3.2.1. Matrice de corrélation.....	59
3.2.2. Résultats de l'ACP et choix des composantes.....	59
3.2.3. Résultats de l'analyse de classification (Clustering) .....	61
3.2.4. Emplacement des points de prévision .....	64
3.2.5. Application de cartographie Web.....	65
3.2.6. Validation .....	66
3.3. CONCLUSION : DÉTERMINATION DES ZCH .....	67
<b>4. CHAPITRE 3 : OPTIMISATION DU RÉSEAU DE SMR.....</b>	<b>68</b>
4.1. MÉTHODOLOGIE PROPOSÉE.....	70

4.1.1.	Paramètres de choix d'emplacement .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
4.1.2.	Structuration du problème .....	77
4.1.3.	Formulation de la fonction objectif .....	82
4.2.	RÉSULTATS : OPTIMISATION DU RÉSEAU DE SMR .....	83
4.2.1.	Carte de score total .....	83
4.2.2.	Évaluation du réseau SMR actuel .....	84
4.2.3.	Validation .....	86
4.3.	CONCLUSION : OPTIMISATION DU RÉSEAU DE SMR .....	89
<b>5.</b>	<b>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>	<b>91</b>
<b>6.</b>	<b>RÉFÉRENCES.....</b>	<b>94</b>
	ANNEXE A.....	99
	ANNEXE B.....	101
	ANNEXE C .....	103
	ANNEXE D .....	105
	ANNEXE E.....	111

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1</b>	Critères d'inclusion et d'exclusion pour la revue de littérature de l'objectif 1 .....	14
<b>Tableau 2</b>	Critères d'inclusion et d'exclusion pour la revue de littérature de l'objectif 2 .....	26
<b>Tableau 3</b>	Sources des données utilisées .....	52
<b>Tableau 4</b>	Tableau récapitulatif des prétraitements réalisés.....	53
<b>Tableau 5</b>	Matrice de corrélation des variables initiales .....	59
<b>Tableau 6</b>	Résultat de l'analyse par composantes principales .....	60
<b>Tableau 7</b>	Sources des données utilisées.....	77

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b>	Zones climatiques hivernales (ZCH), points de prévision (PDP) et stations météo-routières (SMR) sur le réseau routier du ministère des Transports du Québec en 2018 .....	10
<b>Figure 2</b>	Cycles de sélection et d'élimination des documents pour l'objectif 1 .....	13
<b>Figure 3</b>	Différence entre les résultats de l'algorithme des k-moyennes et de l'algorithme des k-médoïdes (PAM) avec un jeu de données présentant des données atypiques .....	20
<b>Figure 4</b>	Graphe de connectivité (a), arbre couvrant de poids minimal (b) et régionalisation après élagage (c) .....	22
<b>Figure 5</b>	Exemple de la méthode du coude à l'aide d'un graphique de la somme des carrés intragroupe (WSS) en fonction du nombre de clusters.....	24
<b>Figure 6</b>	Cycles de sélection et d'élimination des documents pour l'objectif 2.....	28
<b>Figure 7</b>	Organigramme décrivant la méthodologie adoptée.....	48

<b>Figure 8</b>	Catégories des variables utilisées.....	49
<b>Figure 9</b>	Répartition des précipitations calculées sur un historique de 30 ans (1988-2018) ..	51
<b>Figure 10</b>	Liste des variables standardisées .....	54
<b>Figure 11</b>	Analyse par composantes principales.....	55
<b>Figure 12</b>	Comparaison des classifications K-moyenne et SKATER.....	57
<b>Figure 13</b>	Résultats de la classification initiale : 12 groupes .....	61
<b>Figure 14</b>	Nombre optimal de groupes suivant la pseudo-statistique de Calinski-Harabasz.....	62
<b>Figure 15</b>	Résultats de la classification à plusieurs niveaux : 88 groupes .....	63
<b>Figure 16</b>	Positionnement proposé des points de prévision .....	64
<b>Figure 17</b>	Application de cartographie Web pour le premier objectif (lien vers application) ....	65
<b>Figure 18</b>	Réseau des stations météo-routières existant.....	68
<b>Figure 19</b>	Organigramme décrivant la méthodologie proposée .....	71
<b>Figure 20</b>	Carte sommaire du cumul de neige hivernal basé sur les normales 1981-2010.....	72
<b>Figure 21</b>	Classification MTQ du vent .....	74
<b>Figure 22</b>	Données liées à la circulation .....	75
<b>Figure 23</b>	Les trois principales catégories de route du Québec.....	76
<b>Figure 24</b>	Cellules potentielles pour l'installation des futurs SMR.....	78
<b>Figure 25</b>	Figure montrant les différents formats des données.....	79
<b>Figure 26</b>	Les données des paramètres d'emplacement retenus mappées sur la grille des emplacements potentiels.....	80

<b>Figure 27</b>	Taux d'accident par jour par débit .....	81
<b>Figure 28</b>	Carte de score total .....	83
<b>Figure 29</b>	Comparaison entre les groupes des cellules contenant une station météo routière et celui ne contenant pas de station .....	85
<b>Figure 30</b>	Répartition des stations météo-routières dans l'espace en imposant une station météo-routière par ZCH.....	87
<b>Figure 31</b>	Répartition des stations météo-routière par phase d'investissement.....	88
<b>Figure 32</b>	Application de cartographie Web pour le deuxième objectif (lien vers application) ..	88

## **GLOSSAIRE**

---

ACP : l'Analyse en Composantes Principales

AF : Analyse factorielle

AGOL : ArcGIS online

CLARA : Clustering LARge Applications

DJMH : Débit journalier moyen hivernal

IDW : Inverse Distance Weighting

MELCCQ : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec

MNT : Modèle numérique du terrain

MST : Moyenne de la température de surface

MTQ : Ministère des Transports de Québec

NAH : Nombre d'accidents hivernaux

PAM : Partitionnement autour des médoïdes

PDP : Point de prévision

SMR : Station météo-routière

SCI : Safety Concern Index

SIG : Système d'information géographique

SKATER : Spatial Kluster Analysis by Tree Edge Removal

SSA : Spatial simulated annealing

TS : température de surface

VMT : Véhicules-miles parcourus

VST : Variabilité de la température de surface

WSS : Within-cluster sum of square errors

ZCH : Zone climatique hivernale

## 1. MISE EN CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

---

L'entretien hivernal du réseau routier du Québec demeure chaque année un défi majeur pour tout le personnel opérationnel du ministère des Transports (MTQ). Le MTQ doit assurer la viabilité hivernale en procédant au rétablissement des conditions de circulation afin de garantir la sécurité des usagers de la route en cas d'intempéries. Il doit donc organiser la surveillance du réseau et prévoir les actions permettant de limiter les accumulations de neige, de verglas ou de givre. Au début des années 2000, dans l'objectif d'améliorer la gestion et la prise de décisions liées aux opérations de maintenance hivernale, le MTQ a mis en place un système de stations météo routières (SMR). D'abord, le réseau routier a été divisé en 90 zones climatiques hivernales (ZCH); le processus de division a été réalisé en collaboration avec des météorologues d'Environnement Canada ainsi qu'en tenant compte des connaissances et de l'expertise du personnel opérationnel du MTQ (Arsenault, 2007).

Aujourd'hui, avec l'ajout de la zone des Îles-de-la-Madeleine, on compte 91 ZCH et 53 stations météo routières ont été assignées dans certaines zones au fil des années (figure 1) (Drouin *et al.*, 2019). Un point de prévision (PDP) a également été défini pour 73 ZCH, dans le but de fournir aux opérateurs de maintenance hivernale des prévisions météorologiques ciblées.

Dans l'objectif ultime d'assurer la sécurité des usagers de la route, la justesse des prévisions produites aux PDP est nécessaire pour mettre en place une gestion efficace et performante des opérations d'entretien hivernal du MTQ, comme le déneigement et le déglacage. À l'heure actuelle, il est nécessaire de se demander si les ZCH déterminées au début des années 2000 sont toujours adéquates, en termes de distribution géographique, de géométrie et de nombre. Il est également important de se questionner sur le caractère optimal du réseau actuel de stations météo routières et sur les critères qui devraient être mis de l'avant pour améliorer le réseau et localiser adéquatement de nouvelles stations.



## **2. CHAPITRE 1. REVUE DE LITTÉRATURE**

---

Cette section du rapport s'inscrit dans une démarche de recherche sur l'optimisation des zones climatiques hivernales et du réseau de stations météorologiques routières du MTQ. Au terme de ce projet de recherche, le ministère bénéficiera d'une nouvelle cartographie de zones climatiques hivernales (objectif 1) ainsi que des orientations stratégiques basées sur une analyse scientifique pour poursuivre le développement de son réseau de stations météo routières (objectif 2). Ces recommandations seront appuyées par une méthodologie scientifique sur l'optimisation du réseau existant et viseront à identifier des localisations à privilégier pour l'implantation de nouvelles SMR. Ce projet de recherche servira également à combler un vide scientifique, puisqu'aucune documentation précise sur la méthodologie utilisée par le MTQ pour la création des ZCH ou le positionnement des SMR n'est disponible aujourd'hui.

La revue de littérature constitue ainsi une assise à l'atteinte de ces objectifs. Elle permet d'identifier les paramètres et variables à prendre en compte pour la réalisation de chacun des objectifs, ainsi que de choisir les approches méthodologiques à préconiser.

Suivant les objectifs du projet de recherche, la revue de la littérature a été réalisée en deux grandes étapes, qui correspondent aux deux sections principales retrouvées dans ce chapitre : l'objectif 1 (détermination des ZCH) et l'objectif 2 (optimisation du réseau de SMR).

## **2.1. Revue de littérature : Objectif 1**

### **2.1.1. Méthode de recherche et critères d'inclusion**

Afin de rédiger le devis pour le projet de recherche, une revue de littérature scientifique partielle a été réalisée en avril 2019. Une première étape nécessaire à la réalisation d'une stratégie de recherche efficace a été de lire les articles scientifiques retenus pour la revue partielle ayant servi à la rédaction de l'offre de service, dans l'objectif de construire une liste de mots-clés liés à la problématique.

Dès le début de la recherche documentaire, il a été rapidement constaté, à notre connaissance, qu'aucune littérature scientifique ne présentait de méthodes pour créer des zones climatiques homogènes basée sur l'inclusion de plusieurs paramètres météorologiques et associée spécifiquement à un réseau routier. Ainsi, plutôt que de rechercher des études portant sur un zonage en lien avec les routes, il a été convenu de rechercher tout texte comprenant une méthode de régionalisation homogène basée sur des paramètres climatiques ou météorologiques, sans égard à un réseau routier. Des mots-clés ont donc été utilisés pour bâtir des équations de recherche assez larges, qui ont été ajustées pour chaque base de données bibliographiques consultée (annexe A). La recherche documentaire a été réalisée dans les bases de données d'Engineering Village (GEOBASE, GEOREF, Inspec, Compendex) et Web of Science, ainsi que dans Google Scholar. Cependant, comme la recherche concernait dorénavant un sujet très large, soit la régionalisation homogène de paramètres climatiques, un très grand nombre de résultats ont été obtenus (plus de 16 000 articles).

Après élimination des doublons, des résultats ont été retirés à la suite de l'évaluation de la pertinence du titre puis du résumé, en se basant sur les critères d'inclusion et d'exclusion du tableau 1. Un schéma du cycle complet de sélection et d'élimination des documents est présenté à la figure 2. Au final, 120 articles ont été retenus pour une lecture complète et une compilation d'informations pertinentes. Lors de l'étape de la compilation des méthodes et variables utilisées par les études présentes au sein du corpus de base, l'équipe de recherche s'est rapidement rendu compte que les informations devenaient redondantes et que nous atteignons la saturation d'informations au niveau de certaines méthodes utilisées. Ainsi, il a été décidé que seraient conservés uniquement les articles présentant des méthodes qui revenaient très régulièrement

dans la revue, mais également les articles avec des méthodes qui pourraient être testées aisément par notre équipe. Effectivement, en marge de la revue de littérature, une revue des techniques accessibles dans notre contexte de travail a été réalisée, en fonction des logiciels à notre disposition (ArcGIS Pro, ArcMap, R Studio et GeoDa). Ainsi, les méthodes extraites d'articles scientifiques présentées à la section 3.2.3 sont toutes aisément réalisables et testables par notre équipe.

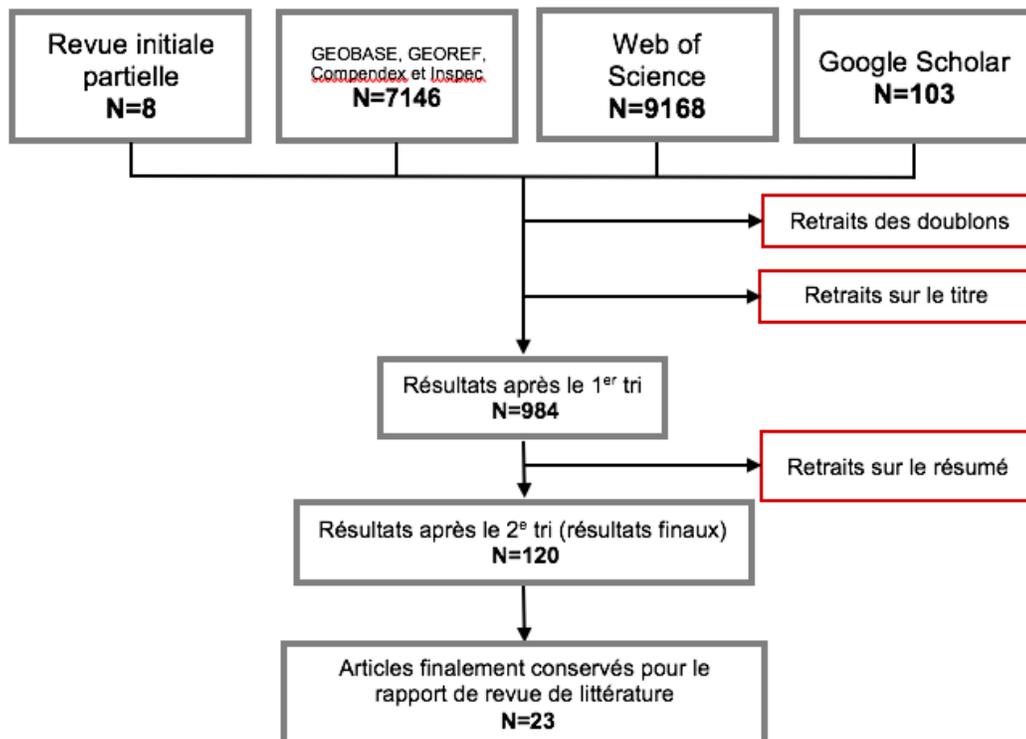


Figure 2 Cycles de sélection et d'élimination des documents pour l'objectif 1

**Tableau 1 : Critères d'inclusion et d'exclusion pour la revue de littérature de l'objectif 1**

<b>Critères d'inclusion</b>	
<b>Langue</b>	Inclure les articles rédigés en anglais ou en français.
<b>Dimension temporelle</b>	Limiter la recherche à une échelle temporelle allant de 1990 à 2019.
<b>Étendue géographique</b>	L'étendue spatiale de l'étude peut être à l'échelle d'un état, d'un pays ou d'une province, mais il peut être réduit au minimum à l'échelle d'une ville s'il en existe.
<b>Thématique</b>	L'objectif 1 du projet consiste à créer des zones climatiques homogènes. La composante spatiale doit être considérée puisque le but est d'avoir une cartographie des zones climatiques. Limiter la recherche aux documents portant sur la régionalisation ou le zonage homogène de paramètres climatiques et météorologiques, peu importe le type (précipitations, vents, températures, etc.).
<b>Critères d'exclusion</b>	
<b>Langue</b>	Exclure tous les articles écrits dans une autre langue que l'anglais ou le français.
<b>Dimension temporelle</b>	Exclure les articles antérieurs à 1990.
<b>Étendue géographique</b>	Exclure les articles ayant une étendue spatiale plus petite que celle d'une ville. Exclure les articles dont l'objectif est la création de zones climatiques à l'échelle planétaire ou continentale puisque l'étendue géographique est trop importante pour être liée à la problématique.
<b>Thématique</b>	Exclure tous les articles ne tenant pas compte de la composante spatiale. Exclure tous les articles dont l'objectif n'est pas de faire un regroupement (en anglais « clustering ») basé sur des paramètres climatiques ou météorologiques dans le but de régionaliser une zone d'étude.

Les notices bibliographiques ont été gérées avec le logiciel de gestion de références Zotero. Ce dernier permet entre autres d'importer les notices à partir des bases de données consultées, de créer une bibliothèque partagée avec plusieurs utilisateurs, de créer des dossiers, d'éliminer aisément les doublons ainsi que d'exporter une bibliographie pour la rédaction d'un rapport. Afin d'extraire efficacement les informations pertinentes des articles consultés, un formulaire a été créé à l'aide du créateur d'enquêtes Microsoft Forms. Pour chaque article, un questionnaire était rempli avec les informations importantes (auteur, date, variables utilisées, méthodologie, résultats, etc.). Il était ensuite possible d'exporter tous les questionnaires sous la forme d'un classeur Excel pour comptabilisation des informations.

## **2.1.2. Résultats de la revue de littérature pour l'objectif 1**

Les sections qui suivent résument les informations pertinentes tirées des textes trouvés à la suite de la recherche documentaire, c'est-à-dire les contextes de création des zones climatiques, les paramètres et variables pris en compte ainsi que la méthodologie utilisée.

### **2.1.2.1. Les contextes de création de zones climatiques dans la littérature**

Comme mentionné plus haut, aucune étude portant sur la création de zones climatiques homogènes précisément en lien avec un réseau routier n'a été trouvée dans la littérature scientifique.

Une majorité d'auteurs présentent une méthodologie de régionalisation afin d'identifier des régimes de précipitations homogènes pouvant servir des objectifs variés comme la gestion des ressources en eau, les modèles de prévisions climatiques ou encore la planification et la gestion liées aux changements climatiques (Modarres, 2006; Yunus *et al.*, 2011; Irwin *et al.*, 2017; Pineda-Martinez et Carbajal, 2017; Raziei, 2018). Par exemple, De Sa Junior *et al.* (2012) utilisent la régionalisation pour identifier des types de climats, dans une perspective de développement et de gestion des activités agricoles. Plusieurs auteurs utilisent la régionalisation pour créer des zones météorologiques homogènes d'une région particulièrement affectée par les sécheresses, en caractérisant les régimes de précipitations (Raziei *et al.*, 2008; Goyal et Sharma, 2016; Azam *et al.*, 2018). L'objectif est alors de permettre aux décideurs politiques de mettre en place une planification et une gestion des risques et des ressources pendant les périodes de sécheresse. Dans un tout autre contexte, certains auteurs ont pour objectif de créer des zones climatiques en milieu urbain (en anglais « local climate zones ») afin de mettre en évidence les îlots de chaleur créés par les villes (Lee et Oh, 2017). L'étude de Darby (2005) a quant à elle pour objectif l'analyse des vents de surface à Houston au Texas, pour comprendre les variations de quantités d'ozone dans l'atmosphère au-dessus de la ville. Kim *et al.* (2016) étudient également les zones homogènes au niveau des vents, mais cette fois-ci dans le but de caractériser les ressources en vent pour l'installation d'éoliennes. Par ailleurs, certains auteurs ont simplement pour but de comparer différentes méthodologies de regroupement, et non d'étudier une problématique particulière de la région analysée (Richman et Adrianto, 2010). Bref, les contextes de création de

zones climatiques dans la littérature sont nombreux et variés, mais aucun ne correspond précisément à notre problématique.

### **2.1.2.2. Paramètres et variables pris en compte**

Dans de nombreuses études, les variables principales utilisées pour la régionalisation relèvent des précipitations : la moyenne des maximums journaliers des précipitations, la moyenne des minimums journaliers des précipitations, les précipitations moyennes mensuelles, les précipitations moyennes annuelles, etc. (Dinpashosh *et al.*, 2004; Modarres, 2006; Raziei *et al.*, 2008; Abdolhay *et al.* 2012; Sarmadi et Shokoohi, 2015; Goyal et Sharma, 2016; Pineda-Martinez et Carbajal, 2017; Azam *et al.*, 2018; Raziei, 2018; Zhang *et al.*, 2018). Dans le cas par exemple de Dinpashosh *et al.* (2004), c'est plus d'une vingtaine de variables associées aux précipitations de pluie qui sont utilisées. Plusieurs auteurs utilisent également des variables liées aux températures (Lee et Oh, 2017; Pineda-Martinez et Carbajal, 2017). Richman et Adrianto (2010) utilisent uniquement le paramètre de la pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer. Darby (2005) et Kim *et al.* (2016) n'utilisent quant à eux que les variables des moyennes horaires de vitesse et de direction des vents de surface.

Dans certains cas, des auteurs utilisent d'autres types de paramètres en plus de variables climatiques. C'est le cas de Dinpashosh *et al.* (2004), Goyal et Sharma (2016), Irwin *et al.* (2017) et Azam *et al.* (2018) qui intègrent des paramètres géographiques de latitude, longitude et altitude. Pineda-Martinez et Carbajal (2017) incluent une variable liée à la couverture végétale qui, selon eux, est un bon marqueur biologique du type de climat. D'autres auteurs vont quant à eux intégrer des données sur les types d'utilisation des sols dans les milieux urbains et sur les caractéristiques morphologiques des villes (Lee et Oh, 2017).

### **2.1.2.3. Méthodologie pour la détermination de zones climatiques**

#### **a. Les méthodes de prétraitement des données**

Avant de procéder au regroupement, plusieurs auteurs utilisent des méthodes de prétraitement des données, comme une standardisation des variables pour éliminer les biais liés aux unités de mesure différentes, une standardisation des variables, ou encore une réduction du nombre de dimensions. Sarmadi et Shokoohi (2015) et Azam *et al.* (2018) procèdent par exemple à une

standardisation des données de précipitations utilisées pour permettre leur comparaison et la création d'une matrice d'autocorrélation.

La méthode de réduction de dimensions la plus utilisée est celle de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) (Fovell et Fovell, 1993; Dinpashosh *et al.*, 2004; Darby, 2005; Raziei *et al.*, 2008; Richman et Adrianto, 2010; Yunus *et al.*, 2011; Pineda-Martinez et Carbajal, 2017; Azam *et al.*, 2018; Raziei, 2018; Zhang *et al.*, 2018; Ippoliti *et al.*, 2019). L'ACP est une procédure statistique qui permet de réduire des variables corrélées à des variables non corrélées entre elles, appelées composantes principales. Pour ce faire, une transformation linéaire impliquant des matrices de covariance et de corrélation est réalisée. Ces nouvelles variables latentes contiennent les informations essentielles des variables initiales. Elles sont utilisées ensuite pour générer des scores et ce sont ces scores qui seront regroupés à la place des variables estimées (indicateurs de base). Richman et Adrianto (2010) utilisent pour leur part une variante de l'ACP appelée Analyse en Composantes Principales de Kernel, qui constitue un modèle non linéaire, contrairement à l'ACP classique qui relève d'un modèle linéaire. Plutôt que de procéder à une ACP, Sarmadi et Shokoohi (2015) utilisent quant à eux une analyse factorielle (AF) comme méthode multivariée.

Pour vérifier la qualité des données brutes, Raziei *et al.* (2008) et Azam *et al.* (2018) utilisent des tests non paramétriques dans le prétraitement de données : le test d'homogénéité de Mann-Whitney, le test de tendances de Mann-Kendall ainsi que le test d'autocorrélation de Kendall.

Par ailleurs, certains auteurs vont réaliser une interpolation sur les données brutes initiales. C'est le cas de Darby (2005) qui procède à une interpolation linéaire des données sur les vents (vitesse et direction) lorsque certaines stations présentent des lacunes, ainsi que de Dinpashosh *et al.* (2004) et Raziei (2018) qui utilisent la méthode d'interpolation par pondération inverse à la distance (IDW) pour estimer les données manquantes à certains endroits.

#### **b. Les méthodes de regroupement (« clustering »)**

L'analyse de regroupement (« cluster analysis »), ou le partitionnement de données, est une méthode de classification, supervisée ou non supervisée, dans laquelle les regroupements sont produits automatiquement grâce à un algorithme (Jolliffe et Philipp, 2010). Dans la littérature, on

retrouve majoritairement deux grandes catégories de classification : les classifications non supervisées et les classifications supervisées. Une classification non supervisée est un regroupement d'éléments qui, initialement, ne sont pas du tout classés, alors qu'une classification supervisée est un regroupement d'un nouvel élément à partir d'éléments qui sont initialement déjà classés et qui constituent ce qu'on appelle un échantillon d'apprentissage. Dans les classifications non supervisées, on retrouve deux sous-catégories de regroupement : les techniques hiérarchiques d'agglomération ou de division, ainsi que les techniques non hiérarchiques d'optimisation.

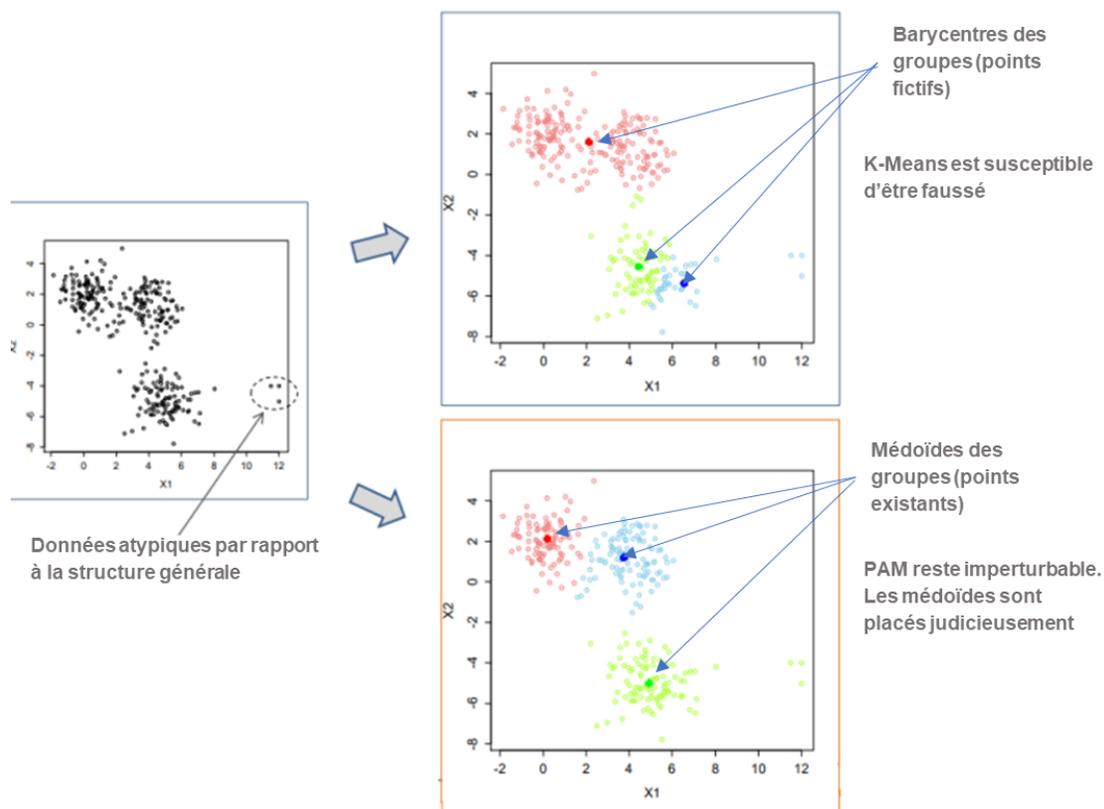
Les techniques hiérarchiques d'agglomération sont des techniques de classification itératives qui consistent, de façon générale, en un nombre  $n$  d'objets à regrouper qui sont successivement fusionnés en plusieurs étapes. Au départ, chaque objet est considéré comme une grappe individuelle. Puis, à chaque étape de l'algorithme, selon une mesure de similarité ou de dissimilarité choisie préalablement, deux groupes sont fusionnés jusqu'à fusion complète des objets  $n$ . Ces techniques produisent comme résultat un dendrogramme, utilisé ensuite pour déterminer la solution optimale avec un nombre de groupes optimal (Jolliffe et Philipp, 2010). Parmi les différentes mesures de similarité ou de dissimilarité utilisées par les auteurs, on retrouve la méthode de Ward (Dinpashosh *et al.*, 2004; Modarres, 2006; Raziei *et al.*, 2008; Pineda-Martinez et Carbajal, 2017; Azam *et al.*, 2018; Raziei, 2018), la méthode de la liaison simple (plus proche voisin), la méthode de la liaison complète (plus lointain voisin) (Sarmadi et Shokoohi, 2015; Kim *et al.* 2016) ainsi que plusieurs variantes de la méthode du lien moyen (Yunus *et al.*, 2011). La mesure de dissimilarité entre deux *clusters* correspond à la dissimilarité entre les objets de ces *clusters*. Ainsi, avec la méthode de la liaison simple, la mesure de dissimilarité (distance) entre deux *clusters* correspond à la plus petite distance entre des objets de ces deux *clusters*. Au contraire, avec la liaison complète, la mesure de dissimilarité entre deux *clusters* correspond à la plus grande distance entre deux objets de ces *clusters*, donc entre les objets les plus éloignés l'un de l'autre. Avec le lien moyen, la mesure de dissimilarité entre deux groupes équivaut à la moyenne des distances entre les objets des groupes. Une variante du lien moyen est la méthode de Ward, communément utilisée avec la mesure de la distance euclidienne au carré (Modarres, 2006). Selon Pineda-Martinez (2017), l'algorithme de Ward est particulièrement efficace pour créer des *clusters* homogènes à partir d'une matrice de covariance ou de corrélation, donc à partir de composantes principales résultant d'une ACP.

Les techniques hiérarchiques de division, au contraire des techniques hiérarchiques d'agglomération, consistent au départ en un seul groupe contenant tous les  $n$  objets, puis qui se subdivise successivement à chaque étape de l'algorithme. À chaque étape de division, un groupe est séparé en deux grappes qui sont le plus différent possible l'une de l'autre selon une mesure de dissimilarité établie préalablement, jusqu'à ce que  $n$  grappes contiennent chacune un objet (Jolliffe et Philipp, 2010).

Le principal désavantage des techniques hiérarchiques d'agglomération ou de division est que par la structure même du dendrogramme, lorsqu'un objet est assigné à un *cluster*, il ne peut pas être assigné à un autre *cluster*. Les *clusters* créés à une étape de l'algorithme sont dépendants des *clusters* créés à l'étape précédente ; il ne s'agit donc pas de créer une partition différente à chaque étape en fonction de l'optimisation d'un critère (comme nous le verrons plus bas) (Abdolhay *et al.*, 2012).

Les techniques non hiérarchiques d'optimisation les plus populaires sont celles des  $k$ -moyennes (Yunus *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2016; Lee et Oh, 2017; Pineda-Martinez et Carbajal, 2017; Azam *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2018). Avec ce type de technique, on souhaite diviser un ensemble de  $n$  objets en  $k$  grappes,  $k$  étant défini au préalable, de façon à minimiser la distance entre le point moyen artificiel d'un groupe (barycentre) et tous les autres points à l'intérieur de ce groupe. À chaque étape de l'algorithme, la partition est meilleure que la précédente, selon un critère, généralement basé sur la sommation du carré des dissimilarités entre les objets d'un même groupe ou entre deux groupes. Ainsi, une bonne partition présentera de grandes valeurs pour la somme des objets entre les grappes ainsi que de plus petites valeurs pour la somme des objets à l'intérieur de chaque grappe. Il s'agit donc de trouver la partition qui optimise le critère, pour un  $k$  donné. Les algorithmes des  $k$ -moyennes sont itératifs, et se terminent lorsqu'il n'y a plus d'autres partitions optimisant le critère choisi (Jolliffe et Philipp, 2010). Par ailleurs, Darby (2005) utilise une technique non hiérarchique itérative différente de celle des  $k$ -moyennes. Il s'agit d'une méthode contenue dans le programme « Interactive Data Language » (IDL) et dans laquelle l'utilisateur peut choisir le nombre de *clusters* à créer et le nombre d'itérations souhaitées dans l'algorithme pour déterminer la pondération et le centre de chaque *cluster*. Ainsi, le désavantage majeur des techniques non hiérarchiques de classification est la subjectivité inhérente au choix préalable du nombre de *clusters*, bien que l'algorithme soit lui-même objectif. Ippoliti *et al.* (2019)

utilisent quant à eux une technique légèrement différente des k-moyennes, soit celle des k-médoïdes, aussi appelé algorithme de « partitionnement autour des médoïdes » (PAM). L'algorithme vise à minimiser l'erreur quadratique moyenne, soit la distance entre les points dans un *cluster* et le point central de ce *cluster* (médoïde). En statistique, un médoïde est un point qui correspond à un objet qui minimise sa propre distance par rapport à l'ensemble des autres objets, il est donc le point le plus central d'une classe. Contrairement au barycentre, qui est un point artificiel qui ne fait pas partie des données, le point du médoïde est un objet qui existe réellement dans l'échantillon. Hahus *et al.* (2018) utilisent quant à eux l'algorithme CLARA (« Clustering LARge Applications »), qui est pratiquement identique au PAM, la différence étant au niveau du stockage des données, pour des jeux de données qui requièrent beaucoup de mémoire. L'algorithme PAM est considéré comme étant parfois plus efficace que les k-moyennes lorsque plusieurs données sont atypiques par rapport à la structure générale (figure 3).



**Figure 3** Différence entre les résultats de l'algorithme des k-moyennes et de l'algorithme des k-médoïdes (PAM) avec un jeu de données présentant des données atypiques

Source : [http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/cours/slides/classif\\_k\\_medoides.pdf](http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/cours/slides/classif_k_medoides.pdf). Modifié par Mireille Lajoie.

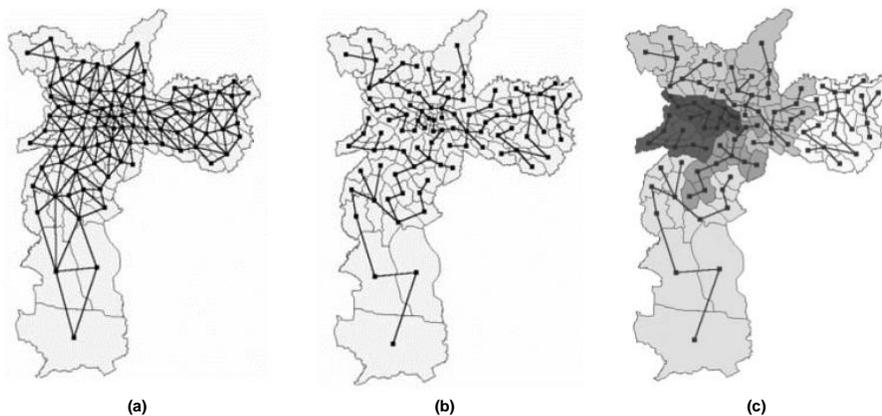
Plusieurs variantes et combinaisons des algorithmes de ces différentes techniques sont utilisées dans la littérature scientifique. Par exemple, certains auteurs utilisent une combinaison d'un regroupement hiérarchique classique avec la méthode de Ward et d'un regroupement par les  $k$ -moyennes (Pineda-Martinez et Carbajal, 2017; Azam *et al.*, 2018). Kim *et al.* (2016) utilisent une méthode en deux étapes comprenant d'abord un regroupement hiérarchique selon la méthode du lien complet, puis un regroupement non hiérarchique selon la méthode des  $k$ -moyennes. Selon Azam *et al.* (2018), l'utilisation d'un algorithme combinant plusieurs méthodes de regroupement permet d'obtenir des résultats finaux plus robustes et plus objectifs.

Yunus *et al.* (2011) utilisent quant à eux une méthode comprenant un mélange de plusieurs algorithmes, incluant un regroupement hiérarchique, un regroupement non hiérarchique puis une classification supervisée. D'abord, une classification hiérarchique avec la méthode du lien moyen est réalisée sur les scores des composantes principales résultant de l'ACP. Le nombre de *clusters* optimal est le nombre qui précède celui qui induit une augmentation drastique dans l'hétérogénéité. Ensuite, en utilisant le nombre de *clusters* optimal déterminé par le regroupement hiérarchique, un regroupement non hiérarchique est réalisé par une méthode de  $k$ -moyennes. Puis, les auteurs génèrent un raster en interpolant les scores des composantes principales, avec la méthode de pondération par l'inverse de la distance (IDW). Finalement, une classification supervisée est réalisée sur ce raster, en utilisant la méthode de la classification de vraisemblance maximale (« maximum likelihood »). Rappelons qu'une classification supervisée nécessite au départ un échantillon d'apprentissage. Dans ce cas-ci, l'échantillon d'apprentissage dans la classification supervisée comprend les *clusters* résultant du regroupement non hiérarchique des  $k$ -moyennes. C'est ainsi que Yunus *et al.* (2011) procèdent à la délimitation de zones climatiques homogènes.

Dans un tout autre ordre d'idée, il est nécessaire de parler ici des techniques de regroupement floues (« fuzzy clustering »), dans lesquelles un objet peut appartenir à plusieurs *clusters*, dans des degrés différents d'appartenance. Cette méthode est utilisée entre autres par Abdolhay *et al.* (2012), Goyal et Sharma (2016), Irwin *et al.* (2017). Il est d'ailleurs à noter que l'étude de Irwin *et al.* (2017) est la seule dont la zone d'analyse est constituée de provinces canadiennes, bien que le contexte demeure très éloigné de notre problématique. Au contraire des autres méthodes précédemment mentionnées, il est certain que la méthode du regroupement flou ne sera pas

testée par notre équipe, puisque notre problématique nécessite que les délimitations des régions climatiques homogènes soient nettement tracées et que chaque entité appartienne à une seule zone.

Finalement, une méthode très différente de toutes celles expliquées plus haut est amenée par Assunção *et al.* (2006) ; il s'agit d'une méthode graphique utilisant un nouvel algorithme créé par les auteurs. Dans cette méthode de classification, les entités surfaciques sont représentées par un graphe de connectivité, qui est élagué grâce à un algorithme pour atteindre des *clusters* contigus. Cette technique est avantageuse selon l'auteur puisqu'elle donne une grande importance à la contiguïté spatiale, qui est au cœur de la procédure. Cette dernière se déroule en deux grandes étapes. Premièrement, un graphe de connectivité est construit pour représenter les relations de voisinage entre les entités. Dans le graphe, chaque objet est relié à son voisin par ses limites et un sommet (figure 4). Un « arbre couvrant de poids minimal » est créé à partir de ce graphe. Dans un arbre couvrant de poids minimal, il n'y a pas de circuits (premier nœud  $\neq$  nœud final), tous les nœuds  $n$  sont connectés entre eux par un seul chemin unique et le nombre de segments est  $n - 1$ . À chaque itération, l'algorithme trouve le segment pour lequel la sommation des dissimilarités est minimisée (poids minimal). L'algorithme créé par les auteurs est l'algorithme SKATER (« Spatial 'K'luster Analysis by Tree Edge Removal »). Finalement, l'algorithme de partitionnement permet de retirer un segment à chaque itération, jusqu'à atteindre plusieurs arbres déconnectés, leur nombre correspondant au nombre de groupes souhaités (figure 4).



**Figure 4** Graphe de connectivité (a), arbre couvrant de poids minimal (b) et régionalisation après élagage (c)

Source : Assunção et al. (2006). Modifié par Mireille Lajoie

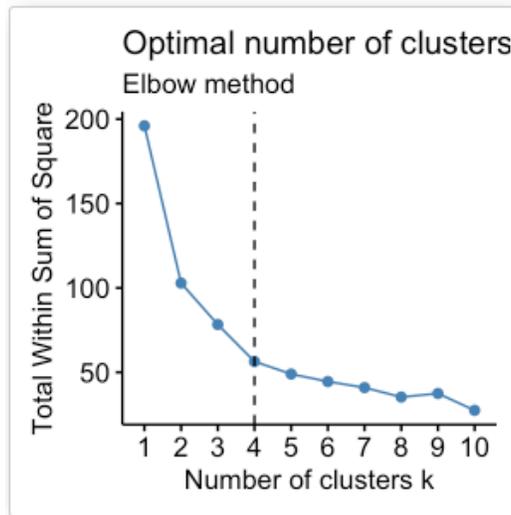
### c. Les méthodes de validation des clusters

Plusieurs auteurs utilisent des indices de validité et réalisent des tests pour valider les régions créées ainsi que pour trouver un nombre optimal de *clusters* à créer. Entre autres, plusieurs types de tests d'homogénéité sont réalisés, par exemple les tests multivariés des L-moments (Dinpashosh *et al.*, 2004; Modarres, 2006; Abdolhay *et al.*, 2012; Sarmadi et Shokoohi, 2015; Goyal et Sharma, 2016; Irwin *et al.*, 2017; Azam *et al.*, 2018). Pour plus de détails sur les tests des L-moments, voir Azam *et al.* (2018). Selon Azam *et al.* (2018) il est préférable de réaliser des tests d'homogénéité multivariés, qui sont plus avantageux que les tests univariés, puisqu'ils permettent entre autres de prendre en considération la corrélation entre les variables et l'incorporation de plusieurs caractéristiques.

Richman et Adrianto (2010), Abdolhay *et al.* (2012), Pineda-Martinez et Carbajal (2017), Raziie (2018), ainsi que Ippoliti *et al.* (2019) utilisent quant à eux les méthodes du coefficient de Silhouette, une mesure basée sur la distance d'un objet *i* aux autres objets d'un même *cluster* et la distance de l'objet *i* avec les objets de *clusters* différents. Autrement dit, il s'agit du ratio entre la cohésion des objets à l'intérieur d'un même *cluster* et la séparation des objets de *clusters* différents. Selon Pineda-Martinez et Carbajal (2017), la méthode du coefficient de Silhouette est particulièrement efficace pour déterminer un nombre optimal de *clusters* avec l'utilisation de la méthode de regroupement hiérarchique de Ward.

Pour choisir le nombre optimal de *clusters* à créer, Darby (2005) procède pour sa part à plusieurs essais dans lesquels elle calcule l'écart-type entre les *clusters*, qui devrait être plus élevé que l'écart-type à l'intérieur d'un même *cluster* pour avoir un regroupement performant. Rappelons que Darby (2005) utilise une méthode non hiérarchique de regroupement qui nécessite de choisir un nombre de *clusters* avant de procéder à l'algorithme de regroupement. Il en va de même pour Zhang *et al.* (2018), qui testent la méthode des *k*-moyennes avec différents nombres de *clusters* prédéfinis, et identifient le nombre de *clusters* optimal à l'aide de divers paramètres d'évaluation basés sur les erreurs de la somme des carrés à l'intérieur d'un *cluster* (« within-cluster sum of square errors » ou WSS). Ainsi, pendant le processus de regroupement, chaque cellule de la grille est assignée puis réassignée à des grappes jusqu'à ce que le WSS soit le plus minimisé possible. En effet, plus le nombre de *clusters* augmente, plus les valeurs de la WSS diminuent, et donc plus la dissimilarité intragroupe est réduite. Avec ces paramètres, il est possible de construire des

graphiques, par exemple un graphique de la WSS en fonction du nombre de *clusters* ( $k$ ) qui permettra ensuite de déterminer le  $k$  optimal à l'aide de la méthode du coude. Le nombre optimal se situe au point au-delà duquel une augmentation du nombre de *clusters* résulte en une diminution de la réduction de dissimilarité (figure 5).



**Figure 5** Exemple de la méthode du coude à l'aide d'un graphique de la somme des carrés intragroupe (WSS) en fonction du nombre de clusters

Source : <https://www.datanovia.com/en/lessons/determining-the-optimal-number-of-clusters-3-must-know-methods/>.

## **2.2. Revue de littérature : Objectif 2**

### **2.2.1. Méthode de recherche et critères d'inclusion**

Comme pour l'objectif 1, une revue de littérature scientifique partielle a été réalisée en avril 2019 dans le but de rédiger un devis pour le projet de recherche. La première étape nécessaire à la mise sur pied d'une stratégie de recherche adéquate a été de lire les articles scientifiques retenus lors de la revue partielle afin de bâtir une liste de mots-clés liés à la problématique.

Pour l'objectif 2, il a été déterminé au préalable que la recherche documentaire serait réalisée à trois niveaux :

- 1) D'abord, dans les bases de données bibliographiques ;
- 2) Ensuite, sur les sites internet des ministères ou départements de transport d'autres pays, provinces ou États américains ;
- 3) Finalement, au niveau des archives du MTQ.

#### **2.2.1.1. Littérature provenant des bases de données**

Les mots-clés déterminés après la lecture des articles retenus lors de la revue partielle en avril ont servi à construire des équations de recherche qui ont été ajustées pour chaque base de données bibliographiques consultée (annexe B). La recherche documentaire a été réalisée dans les bases de données d'Engineering Village (GEOBASE, GEOREF, Inspec, Compendex) et Web of Science, ainsi que dans Google Scholar.

Pour être inclus dans la revue de littérature, les documents devaient répondre à une série de critères d'inclusion déterminés au préalable. Les documents ont été exclus lorsqu'ils correspondaient aux critères d'exclusion également préétablis. Le tableau 2 présente ces critères d'inclusion et d'exclusion en détail.

**Tableau 2 : Critères d'inclusion et d'exclusion pour la revue de littérature de l'objectif 2**

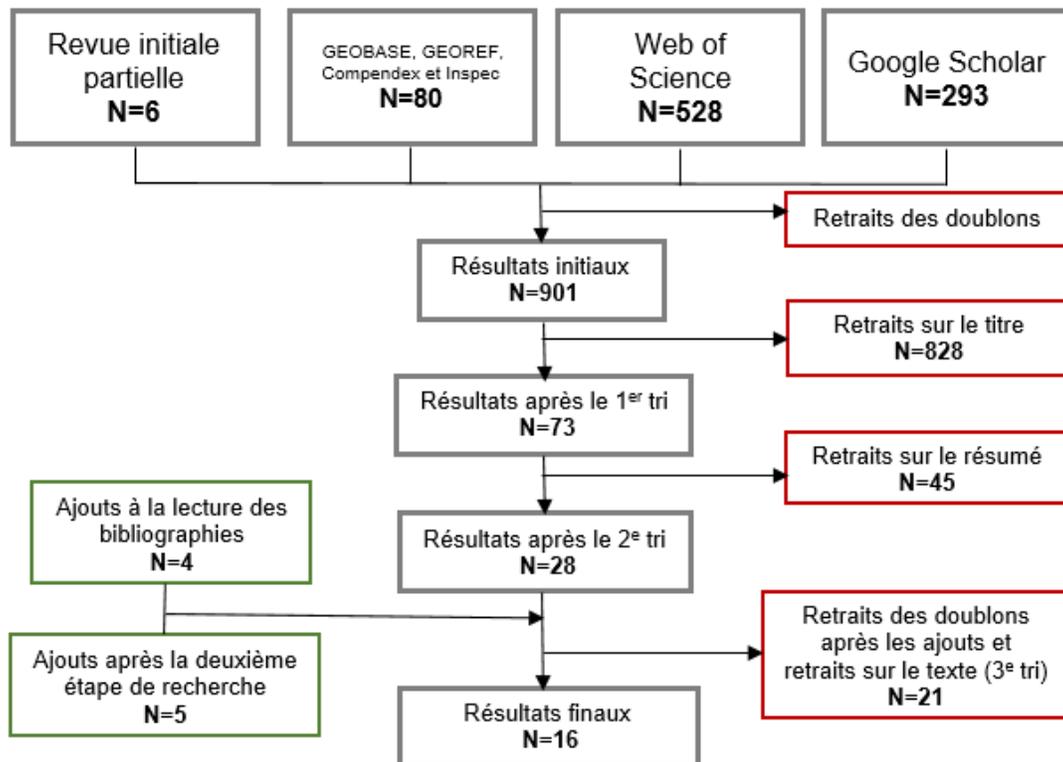
<b>Critères d'inclusion</b>	
<b>Langue</b>	Inclure les articles rédigés en anglais ou en français.
<b>Dimension temporelle</b>	Limiter la recherche à une échelle temporelle allant de 1990 à 2019.
<b>Étendue géographique</b>	L'étendue spatiale de l'étude peut être à l'échelle d'un état ou d'un pays, mais il peut être réduit au minimum à l'échelle d'une ville s'il en existe. De préférence, retenir des études ayant porté sur des pays ou régions ayant des conditions climatiques similaires au Québec, telles que les pays nordiques. Cela n'exclut pas les études portant sur d'autres régions du monde ayant des conditions différentes, dépendamment de leur pertinence.
<b>Thématique</b>	L'objectif 2 du projet consiste à l'optimisation de la localisation des stations météo routières. La composante spatiale doit être considérée vu que le but est d'avoir une cartographie du positionnement optimal des stations. Limiter la recherche aux documents portant sur les stations météorologiques à usage routier seulement. Pour cela, une liste de mots-clés a été préalablement définie.
<b>Critères d'exclusion</b>	
<b>Langue</b>	Exclure tous les articles écrits dans une autre langue que l'anglais ou le français.
<b>Dimension temporelle</b>	Exclure les articles antérieurs à 1990.
<b>Étendue géographique</b>	Exclure les articles ayant une étendue spatiale plus petite que celle d'une ville.
<b>Thématique</b>	Exclure tous les articles ne tenant pas en compte de la composante spatiale, ainsi que ceux qui font référence à des stations météorologiques ayant d'autres usages autres que l'usage routier. Exclure tous les articles faisant référence à l'optimisation de la maintenance hivernale au niveau des outils et des instruments utilisés pour le déneigement et le déglacement des routes. Il s'agit donc d'exclure les articles qui visent à optimiser la maintenance au niveau opérationnel. Exclure tous les articles faisant référence à l'utilisation des données transmises par les stations météorologiques routières pour la prévision météorologique. L'objectif du travail n'est pas d'optimiser les données reçues, mais bien d'optimiser la localisation des stations. Exclure les études ayant pour but d'analyser l'efficacité de la maintenance hivernale puisque l'objectif n'est pas de recenser les problématiques de la maintenance hivernale localement, mais bien d'optimiser le positionnement de nouvelles stations. Exclure les articles qui ne proposent pas de méthodologie associée au positionnement de nouvelles stations et qui abordent la maintenance hivernale de façon trop générale.

Les cycles de sélection et l'élimination de documents se sont réalisés en trois étapes, à l'aide du logiciel de gestion bibliographique Zotero : un premier tri à la lecture du titre, un deuxième tri à la lecture du résumé et finalement un dernier tri à la lecture du texte, sur la base des critères d'inclusion et d'exclusion établis au préalable. Après avoir effectué les recherches sur les différentes bases de données, les résultats ont été importés dans Zotero et les doublons ont été éliminés ; le nombre initial de documents était de 901 résultats. Au terme de cette première étape de recherche et des tris effectués, 12 documents ont été retenus pour la revue de littérature. Pour connaître le nombre d'articles retenus à chaque tri, voir la figure 6.

### **2.2.1.2. Littérature sur les méthodes utilisées par d'autres gouvernements**

Une deuxième recherche documentaire a été réalisée directement par le biais des sites internet de ministères ou de départements du transport d'autres pays, provinces canadiennes ou États américains. Le but de cette recherche était de mettre la main sur des rapports gouvernementaux ou des rapports scientifiques préparés pour le gouvernement et qui expliqueraient les paramètres et les méthodologies utilisées pour l'optimisation des SMR ailleurs qu'au Québec. Des mots-clés ont donc été entrés directement dans les barres de recherche des sites gouvernementaux. Des sites de plusieurs pays, provinces canadiennes ou États américains présentant des conditions climatiques similaires au Québec ont été consultés. De nombreuses informations factuelles sur les SMR de plusieurs pays, provinces ou états ont été trouvées, mais très peu de rapports complets et détaillés sur les méthodologies liées à l'optimisation du réseau étaient mis à disposition du public. C'est pourquoi au terme de cette recherche, seulement 5 documents pertinents ont été lus et retenus pour la revue de littérature.

Finalement, après avoir inclus ces documents aux 12 articles conservés à la section 4.1.1 et éliminé les doublons générés par cet ajout, un total de 16 documents ont été officiellement lus en entier et retenus pour la revue de littérature de l'objectif 2. La figure 6 présente le cycle de sélection de documents au terme de toutes les recherches documentaires effectuées.



**Figure 6 Cycles de sélection et d'élimination des documents pour l'objectif 2**

Il est à noter qu'à ce point-ci de la recherche documentaire, la base de données OVID, qui contient entre autres des articles dans le domaine du transport, a également été consultée sommairement puisqu'elle comporte beaucoup de rapports de littérature grise. Cependant, les résultats pertinents qui sont ressortis de cette recherche constituaient des doublons de documents déjà trouvés auparavant ; ils n'ont donc pas été ajoutés sur Zotero.

En marge de cette revue de littérature provenant des sites gouvernementaux, des échanges de courriels ont également été réalisés avec des personnes-ressources de certains ministères. Ainsi, nous avons communiqué avec M. Jeff Baker de l'Ontario, M. Simon Walker de la Colombie-Britannique, ainsi que M. Micheal Adams de l'État du Wisconsin. Ces personnes ont pu nous donner plus de détails sur les méthodes utilisées par leur ministère respectif pour l'optimisation de leur réseau de SMR. Leurs réponses ont été intégrées au tableau de l'annexe D du présent rapport.

Dans le but de mettre en évidence les paramètres et les méthodes utilisées par les gouvernements d'autres provinces, pays ou états américains, un tableau synthèse a été réalisé (annexe D). Ce tableau contient les paramètres et les méthodes qui ont été utilisées ou qui seront utilisées par le ministère ou le département du transport en question, selon les informations recueillies d'articles, de rapports ou d'échanges de courriels avec des personnes-ressources de ces gouvernements. Ce tableau comprend uniquement les pays, provinces ou états pour lesquels un minimum d'information était disponible.

### **2.2.1.3. Littérature provenant des archives du MTQ**

À la suite des recherches effectuées sur les bases de données puis sur les sites internet gouvernementaux, une recherche a été réalisée dans les archives du MTQ dans le but de déterminer s'il existe des documents ou des rapports expliquant en détail la méthodologie utilisée pour le positionnement initial des SMR au Québec. Pour ce faire, nous nous sommes donc rendus au centre de documentation du MTQ dans la ville de Québec. Sur place, trois documents en format numérique concernant la problématique des SMR ont été trouvés. Ces trois documents de 1994, 1997 et 1999 constituent des rapports d'un projet pilote de positionnement de stations météo routières, mené par la géographe et climatologue Monique Plamondon. Cependant, ces rapports ne présentent pas de méthodologie détaillée d'optimisation d'un réseau, alors ils n'ont pas été retenus pour la revue de littérature. Les informations pertinentes de ces rapports ont été quand même synthétisées dans le tableau de l'annexe C.

### **2.2.2. Résultats de la revue de littérature pour l'objectif 2**

Les sections qui suivent résument les informations pertinentes retirées des textes trouvés à la suite de la recherche documentaire, c'est-à-dire les paramètres et variables pris en compte pour le positionnement des SMR et la méthodologie utilisée.

#### **2.2.2.1. Paramètres et variables pris en compte**

Dans l'objectif que le positionnement des SMR représente les conditions météorologiques d'un tronçon routier afin d'y maximiser l'efficacité de la maintenance hivernale, la plupart des études analysées s'entendent pour incorporer des variables météorologiques dans leur calcul d'optimisation. Plusieurs auteurs incluent dans leurs modèles un amalgame de variables comme

la température minimum et moyenne à la surface du sol, la variabilité de la température de surface (le nombre de semaines pendant lesquelles la température de surface varie en dessous et au-dessus du point de congélation), ainsi que l'accumulation moyenne annuelle de neige (Kwon *et al.*, 2013; Kwon et Fu, 2013; Chien *et al.*, 2014; Kwon et Fu, 2016; Zhao *et al.*, 2016). Zhao *et al.* (2015) n'utilisent quant à eux que le paramètre d'accumulation moyenne annuelle de neige. Chien *et al.* (2014) et Zhao *et al.* (2016) incorporent également des données sur la durée moyenne de pluie verglaçante. Kwon *et al.* (2016, 2017) utilisent aussi des données de condition de surface des routes, plus précisément 11 catégories de sévérité des conditions routières de surface, pour optimiser un réseau de SMR déjà existant.

Pinet et Lo (2003), dans leur rapport sur le développement du réseau de SMR en Alberta, ont également utilisé des paramètres météorologiques, cependant aucun détail n'est donné sur ces derniers. Quant à Pinet (2009), il a intégré dans son analyse de l'optimisation du réseau de SMR en Alberta une carte de zones météorologiques créée quelques années plus tôt. La méthodologie utilisée pour la création de cette carte n'est cependant pas disponible aujourd'hui. On peut noter par ailleurs que l'étude de Laurinavicus *et al.* (2007) est la seule étude qui utilise uniquement des paramètres météorologiques, soit les variations de températures de surface de la chaussée, sans aucun autre type de paramètres tels que ceux qui seront mentionnés ci-dessous. Au contraire, Fetzer *et al.* (2018) sont les seuls auteurs qui n'incluent aucun paramètre météorologique.

Une grande majorité d'études consultées s'entendent pour incorporer des données liées aux accidents de la route et au trafic, puisque l'optimisation d'un réseau de SMR a souvent pour objectif final de réduire le nombre d'accidents, en améliorant la maintenance hivernale. Certains auteurs utilisent, entre autres, des variables liées au trafic et aux accidents, par exemple la fréquence de collision, le nombre d'accidents en hiver, les types de collisions, les conditions de surface au moment de l'accident, la moyenne annuelle du volume du trafic journalier et la classification des autoroutes (Pinet et Lo, 2003; Pinet, 2009; Kwon et Fu, 2013; Kwon *et al.*, 2013 et 2014; Zhao *et al.*, 2015; Kwon et Fu, 2016; Kwon *et al.*, 2016; Kwon *et al.*, 2017; Fetzer, 2018). Zhao *et al.* (2016) utilisent également des données sur le trafic (moyenne annuelle du volume de trafic par jour) pour l'optimisation du réseau de SMR, mais uniquement dans l'objectif d'introduire une analyse coûts-bénéfices dans leur étude.

Walker (2012) utilise quant à lui uniquement des données sur la moyenne annuelle du volume de trafic journalier, ainsi que le nombre d'accidents s'étant produits dans de mauvaises conditions de météorologie et de surface de la chaussée. Évidemment, comme l'étude est réalisée au Texas, certaines conditions considérées par l'auteur comme des conditions de mauvais temps (pluie, brume, neige, grêle, rafales de sable, vents forts, chaussée mouillée, chaussée avec eau stagnante, glace, sable ou boue) s'appliquent précisément au climat du Texas tout au long de l'année. Comme Walker, Jin *et al.* (2014) ainsi que Singh *et al.* (2014) utilisent uniquement des données sur les accidents liés à de mauvaises conditions de température ou de surface de la chaussée, sans autres paramètres.

Pour ce qui est des paramètres géographiques et environnementaux, plusieurs auteurs utilisent des variables comme la latitude, la longitude et l'altitude (Pinet et Lo, 2003; Kwon et Fu, 2016). Kwon *et al.* (2013) et Kwon et Fu (2013) y ajoutent l'élévation au-dessus de la mer, la distance par rapport à un point d'eau ainsi que la topographie relative. Les auteurs justifient l'utilisation de telles variables en expliquant que la latitude devrait affecter la variation spatiale des températures de surface, la longitude peut illustrer l'influence des vents, l'élévation au-dessus de la mer peut être liée aux températures de surface, alors que la distance à un point d'eau en distance euclidienne permet d'illustrer le degré de continentalité. La topographie relative est quant à elle intégrée dans l'analyse de façon à représenter l'orientation des pentes. Certaines études incorporent la variable de la distance entre les sites potentiels d'installation de nouvelles SMR et les sites de stations existantes (Pinet, 2009; Zhao *et al.*, 2015; Singh *et al.*, 2016; Fetzer, 2018). Walker (2012) utilise pour sa part la distance linéaire entre les points d'accidents de la route et les stations météorologiques existantes les plus proches.

Par ailleurs, quelques études incorporent dans leurs modèles d'optimisation du réseau de SMR des paramètres liés aux coûts des opérations de maintenance, comme le coût du travail du personnel, des équipements, du matériel, ainsi que le coût de maintenance prévu annuellement (Kwon *et al.* 2014; Kwon et Fu, 2016; Singh *et al.*, 2016; Fetzer *et al.* 2018).

Finalement, mentionnons que Chien *et al.* (2014) ont utilisé, en plus de données météorologiques, des informations provenant de questionnaires réalisés avec le personnel de gestion de maintenance hivernale. C'est également le cas de Pinet et Lo (2003) et Pinet (2009), qui ont basé une grande partie de leurs analyses sur la connaissance et l'expertise des opérateurs de

maintenance hivernale, sous la forme d'entrevues et de questionnaires pour identifier ou valider des sites de SMR potentiels. De plus, à la lecture des informations incluses dans le tableau de l'annexe D, et notamment les échanges de courriels avec des personnes-ressources de certains ministères, il nous apparaît nécessaire de relever le fait que plusieurs d'entre eux donnent un poids très important aux connaissances et à l'expertise des opérateurs de maintenance hivernale dans la définition de localisations de nouvelles SMR.

### **2.2.2.2. Méthodologie pour l'optimisation du réseau**

Avant d'aborder les méthodes préconisées pour optimiser un réseau de stations météorologiques, on peut noter que la grande majorité des auteurs choisissent d'abord d'appliquer une grille sur la région étudiée, divisée en cellules qui sont toutes des emplacements candidats à l'installation de stations. Seuls Walker (2012) et Jin *et al.* (2014) choisissent de diviser le réseau routier en tronçons, ou segments, plutôt que d'appliquer une grille sur le secteur à l'étude. Dans le but de créer un modèle d'optimisation d'un réseau de SMR, la majorité des auteurs utilisent un modèle de fonction-objectif, dans lequel une fonction est développée à l'aide d'un algorithme de base, puis maximisée ou minimisée de façon à déterminer les cellules optimales pour le positionnement de SMR.

#### **a. L'approche des mesures substitutives**

Dans leur étude, Kwon et Fu (2016) présentent trois méthodologies complètes pour l'optimisation d'un réseau de SMR. La première, également utilisée par Kwon et Fu (2013) et Kwon *et al.* (2013), est une approche heuristique basée sur deux types de mesures substitutives pour déterminer la localisation optimale de SMR. Ces deux mesures comprennent des paramètres liés à la météorologie et des paramètres liés au trafic, regroupant 6 variables au total : la variabilité de la température de surface (VST), la moyenne de la température de surface (MST) et les précipitations neigeuses, le volume du trafic, le taux d'accidents et le type de route.

D'abord, des variables géographiques et environnementales (latitude, longitude, élévation au-dessus du niveau de la mer, distance à un point d'eau et topographie relative) sont utilisées pour réaliser une analyse de régression linéaire multiple dans le logiciel SPSS. Les équations résultant de cette analyse de régression permettent d'estimer les valeurs des deux variables principales de températures (VST et MST) pour chaque cellule.

$$VST = 0,403(lat) + 0,076(long) + 0,161(dist) - 0,011(Topo) - 5,974$$

$$R^2 = 72,2\%$$

$$MST = -2,398(lat) - 0,518(long) - 0,016(elev) + 0,296(dist) - 0,049(Topo) + 61,937$$

$$R^2 = 88,3\%$$

Ainsi, chaque cellule de la grille se voit donc affectée d'une valeur de VST, de MST, puis d'une valeur de précipitations neigeuses, de taux d'accidents, de volume de trafic et de type de route. Un modèle d'optimisation est ensuite formulé de façon à maximiser la valeur totale pondérée de toutes les variables mises ensemble, afin de sélectionner un emplacement optimal. La formule d'optimisation à fonction-objectif est donc la suivante :

$$Maximize S = \sum_{k=1}^M (\omega_w sw_k + \omega_t st_k + \omega_m sm_k)$$

Où S est la valeur totale définie comme étant la somme pondérée des valeurs de différents sites ;  $sw_k$  la valeur d'une variable liée à la météorologie,  $st_k$  la valeur d'une variable liée au trafic,  $sm_k$  la valeur de la variable du coût de maintenance ;  $k$  la cellule potentielle d'installation d'une station ; et  $\omega_w$ ,  $\omega_t$ ,  $\omega_m$ , le poids donné aux variables.

Ainsi, chaque cellule se voit attribuer une valeur unique pouvant être mise dans un ordre qui permet de déterminer son importance en tant que site d'installation d'une station. De cette façon, le poids donné à chacun des paramètres peut varier d'une région à une autre, et peut être décidé par exemple en consultant le personnel de gestion de maintenance hivernale.

### b. L'approche des coûts-bénéfices

La deuxième méthode utilisée par Kwon et Fu (2016), également utilisée par Kwon *et al.* (2014), comprend un modèle d'optimisation à fonction-objectif basé sur les coûts-bénéfices. Un modèle empirique est construit pour quantifier les bénéfices des SMR, c'est-à-dire la réduction des coûts de maintenance et la réduction des collisions entre véhicules. Les éléments de bénéfices sont par exemple définis ainsi :

$$B_i^{Maintenance} = MC_i^{Avec SMR} - MC_i^{Pas de SMR}$$

$$B_i^{Sécurité} = AC_i^{Avec SMR} - AC_i^{Pas de SMR}$$

Où  $B_i^{Maintenance}$  est le bénéfice de maintenance attendu, ou plus précisément les coûts de maintenance réduits à la suite de l'installation des SMR dans une localisation  $i$  ;  $B_i^{Sécurité}$  est le bénéfice de sécurité attendu, ou plus précisément les coûts réduits des collisions à la suite de l'installation de SMR dans une localisation  $i$  ;  $MC_i^{Avec SMR}$  est le coût annuel total attendu de maintenance pour la localisation  $i$  s'il existe une SMR à proximité ;  $MC_i^{Pas de SMR}$  est le coût annuel total attendu de maintenance pour la localisation  $i$  s'il n'y a pas de SMR à proximité ;  $AC_i^{Avec SMR}$  et  $AC_i^{Pas de SMR}$  sont respectivement le coût annuel total attendu des collisions s'il existe une SMR à proximité et le coût annuel total attendu des collisions s'il n'existe pas de SMR à proximité.

De multiples régressions linéaires sont réalisées pour développer des modèles de coûts de maintenance ( $MC_i^{Avec SMR}$  et  $MC_i^{Pas de SMR}$ ) et de fréquence de collisions ( $AC_i^{Avec SMR}$  et  $AC_i^{Pas de SMR}$ ) en fonctions de différentes variables. Ainsi, chaque cellule de la grille, avec ou sans SMR à proximité, se voit assigner une valeur de coûts de maintenance et de collision, qui est ensuite utilisée pour estimer le bénéfice des SMR pour une année. Finalement, une fonction-objectif est formulée pour l'optimisation de SMR. L'objectif est de maximiser les bénéfices totaux calculés par les deux éléments calculés plus tôt (maintenance et accidents) :

$$Maximize B = \sum_{k=1}^M (B_i^{Maintenance} + B_k^{Sécurité})$$

Où B est la fonction-objectif maximisée, définie comme la sommation des bénéfices de tous les sites sélectionnés.

Zhao *et al.* (2015) utilisent eux aussi un modèle d'optimisation à fonction-objectif basé sur les coûts-bénéfices. La formule de score total pour tous les sites est la suivante :

$$Maximize S = \sum_i x_i (\alpha_w s_{w_i} + \alpha_t s_{t_i} + \alpha_d s_{d_i})$$

Où S est la sommation des scores pondérés de tous les sites ;  $x_i$  une variable binaire de décision, si  $x_i = 1$  le site  $i$  est sélectionné, si  $x_i = 0$  le site  $i$  n'est pas sélectionné ;  $s_{w_i}$  est le score de la moyenne annuelle d'accumulation de neige ;  $s_{t_i}$  est le score de la moyenne annuelle du trafic

journalier ;  $s_{d_i}$  est le score de la distance aux stations existantes ;  $\alpha_w$ ,  $\alpha_t$  et  $\alpha_d$  sont les pondérations des variables.

La contrainte du budget est formulée par Zhao *et al.* (2015) de la façon suivante :

$$\sum_i x_i c_i \leq U$$

Où  $c_i$  représente le coût de chaque station au site  $i$  (l'installation initiale et le coût de maintenance annuel), et  $U$  représente le budget total disponible. Les auteurs ajoutent également à l'équation d'optimisation des contraintes de distance à des stations déjà existantes.

### c. L'approche des erreurs d'estimation spatiale

Dans la troisième méthode utilisée par Kwon et Fu (2016) ainsi que Kwon *et al.* (2016) et Kwon *et al.* (2017), un modèle d'optimisation à fonction-objectif est utilisé, mais le but est de minimiser cette fonction et non de la maximiser. L'approche est basée sur l'inférence spatiale, c'est-à-dire la maximisation de la capacité de surveillance globale du réseau de SMR, ou plus précisément, la minimisation des erreurs d'estimations spatiales. Pour modéliser la capacité de surveillance d'un réseau, l'approche géostatistique du krigeage ordinaire est utilisée. Les résultats du krigeage sont des moyennes pondérées de données d'échantillon, et les pondérations sont déterminées en considérant l'interaction spatiale (la distance de séparation ou le « lag ») entre les points observés et les points à prédire. La variance de krigeage, c'est-à-dire la variance de l'erreur d'estimation de krigeage, permet de calculer des erreurs d'estimation à des localisations inconnues à partir d'un ensemble d'observations, en caractérisant et quantifiant la variabilité spatiale sur la zone d'intérêt. Les stations météorologiques sont déplacées sur la région d'intérêt et il est possible d'évaluer l'effet de ces mouvements sur les erreurs d'estimation. C'est ainsi que la variance de krigeage peut être utilisée comme un critère d'optimisation et d'analyse d'un réseau de SMR (Kwon et Fu, 2016; Kwon *et al.*, 2016 et 2017). Ainsi, selon les auteurs, une localisation avec plus d'erreurs d'estimation devrait nécessiter plus d'attention que celles avec moins d'erreurs. Pour le système d'équations détaillées du krigeage, voir Kwon *et al.* (2016, 2017).

Dans le cas de Kwon et Fu (2016) et de Kwon *et al.* (2017), avant de procéder au krigeage, une analyse variographique est d'abord nécessaire pour estimer la dépendance spatiale de la variable

examinée, dans ce cas-ci la température de surface. Une fonction de semi-variogramme est donc utilisée pour déterminer l'autocorrélation (covariance) entre deux localisations. Pour analyser en détail le modèle de semi-variogramme, voir Kwon et Fu (2016). Dans le cas de Kwon *et al.* (2016), le système d'équations de krigeage est résolu en termes de covariances plutôt que de semi-variances (semi-variogramme). Selon les auteurs, le résultat demeure cependant équivalent, peu importe le type de fonctions.

En plus des erreurs d'inférence spatiale déterminées par le krigeage, Kwon et Fu (2016) et Kwon *et al.* (2016 et 2017) intègrent dans la fonction-objectif le critère de la moyenne annuelle du trafic journalier. Ainsi, la fonction-objectif pour l'optimisation des SMR se résume comme suit :

$$\text{Minimize } I = \sum_{k=1}^M (\text{Crit1}_k \cdot w_1 + \text{Crit2}_k \cdot w_2)$$

Où Crit1 représente les erreurs d'estimation des mesures de SMR produites par le krigeage ; Crit2 représente le critère du trafic ; les termes de pondération ( $w$ ) sont inclus dans l'objectif que les décideurs opérationnels puissent définir différents poids en fonction des besoins. À cette fonction-objectif, tous les auteurs ajoutent deux contraintes supplémentaires : une première contrainte de coûts limites d'installation de SMR et de maintenance annuelle des stations et une deuxième contrainte pour assurer l'installation d'un nombre fixe de stations sur le réseau. Pour consulter la formulation mathématique complète et détaillée de la fonction-objectif, voir Kwon *et al.* (2017).

Cependant, les fonctions et équations formulées sont insolubles sur le plan informatique puisque le volume de solutions générées est beaucoup trop élevé. En principe, tel que mentionné plus haut, il suffirait de choisir la combinaison de localisations de stations pour laquelle la variance de krigeage serait la moins élevée. Pour ce faire, toutes les combinaisons possibles devraient être calculées de façon exhaustive et ce nombre serait trop élevé pour que cette recherche soit faisable informatiquement (Kwon *et al.* 2016). Pour pallier ce problème, Kwon *et al.* (2016, 2017) et Kwon et Fu (2016) utilisent la technique du recuit spatial simulé (« spatial simulated annealing » ou SSA). Le SSA est un algorithme itératif d'optimisation qui permet de calculer une séquence de combinaisons en dérivant à chaque étape une nouvelle combinaison à partir d'une légère modification d'une combinaison précédente, jusqu'à trouver la solution optimale. Pour plus de détails, voir Kwon *et al.* (2017).

**d. L'approche de minimisation des taux d'accidents dans de mauvaises conditions météorologiques**

Dans leur étude, Walker (2012) et Jin *et al.* (2014) utilisent une fonction-objectif à minimiser, basée sur les taux d'accidents dans de mauvaises conditions plutôt que sur des variables météorologiques. Ainsi, le réseau routier est divisé en segments et chaque segment se voit attribuer une valeur de taux d'accidents, représentée par un point. Les auteurs calculent d'abord le taux d'accident pour chaque segment (voir Walker, 2012 ou Jin *et al.*, 2014 pour plus de détails), puis un indice de préoccupation en matière de sécurité (« Safety Concern Index » ou SCI) est créé avec l'équation suivante :

$$SCI_i = \alpha_i(m) \cdot f(r_i)$$

Où  $f(r_i)$  est une fonction du taux d'accident  $r_i$  pour le segment de route  $i$  ;  $\alpha_i(m)$  représente un facteur de réduction basé sur la distance entre un site potentiel et le site  $m$  de la SMR déjà existante la plus proche. Le facteur de réduction est calculé avec l'équation suivante :

$$\alpha_i(m) = 1 - e^{-\lambda \min\|(x_i, y_i) - (rx_m, ry_m)\|}$$

Où  $(x_i, y_i)$  est le point central du segment de route  $i$  ;  $(rx_m, ry_m)$  est le point central du segment de route où une SMR existante  $m$  est localisée ; l'expression  $\| \cdot \|$  permet de calculer la distance euclidienne entre deux points ; l'expression  $\min(\cdot)$  permet de retenir la distance minimale ; et  $\lambda$  est le facteur d'échelle de la fonction exponentielle. Ainsi, la fonction-objectif qui résulte de ces équations se présente comme suit :

$$\text{Minimize } SCI = \sum_{i=1}^N \alpha_i(m) f(r_i)$$

Pour résoudre ce programme, un algorithme est mis en œuvre grâce au logiciel MATLAB. Dans cet algorithme, les stations  $m$  sont localisées de façon séquentielle ; la première station est localisée dans le but de minimiser le SCI initial. Ensuite, une deuxième station est localisée et un nouveau SCI minimal est calculé ; ce processus est ainsi répété jusqu'à ce que toutes les stations  $m$  soient localisées. Pour analyser en détail le processus d'optimisation, voir Walker (2012).

**e. L'approche basée sur les taux d'accidents reliés à de bonnes et de mauvaises conditions météorologiques**

À l'opposé de Walker (2012) et Jin *et al.* (2014), Singh *et al.* (2016) choisissent d'optimiser le système de SMR d'une région en se basant non pas uniquement sur des accidents liés aux mauvaises conditions routières, mais également sur les accidents s'étant produits dans des conditions normales. Effectivement, selon les auteurs de cette étude, les accidents se produisant dans de mauvaises conditions météorologiques ne sont pas nécessairement causés par des changements dans les conditions. Ainsi, selon eux, un modèle qui considérerait uniquement les accidents dans de mauvaises conditions routières pourrait ne pas être efficace.

Le modèle proposé repose sur trois niveaux d'optimisation. Premièrement, un indice de vulnérabilité est calculé. Pour ce faire, une grille est appliquée sur la région, qui est divisée en cellules pour lesquelles les attributs suivants sont donnés :

$L * L$	Grosseur de la cellule
$(m, n)$	Index de la cellule
$T$	Période d'étude en jours
$N_A$	Durée des mauvaises conditions météorologiques pendant $T$
$G_{mn}$	Nombre d'accidents dans de bonnes conditions météorologiques
$A_{mn}$	Nombre d'accidents dans de mauvaises conditions météorologiques
$AADT_{mn}$	Moyenne annuelle du trafic journalier au niveau de la cellule
$E_{mn}$	Efficacité de la cellule ( <b><i>il est à noter que dans l'article, aucune explication n'est donnée par l'auteur sur cet attribut et sur la façon de le calculer</i></b> )
$P$	Horizon de planification (nombre d'années pour le déploiement des stations)
$G'_{mn}$	Taux normalisé des accidents dans de bonnes conditions météorologiques
$A'_{mn}$	Taux normalisé des accidents dans de mauvaises conditions météorologiques

Les taux d'accidents normalisés sont calculés avec les formules suivantes :

$$G'_{mn} = \frac{G_{mn} * T}{(T - N_A) * AADT} \quad A'_{mn} = \frac{A_{mn} * T}{N_A * AADT}$$

Ainsi, un indice de vulnérabilité est calculé pour chaque cellule. La vulnérabilité d'une cellule est basée sur le changement (différence) dans l'intensité des accidents pendant de mauvaises conditions météorologiques, comparativement aux accidents dans de bonnes conditions :

$$\text{Vulnérabilité d'une cellule } (m, n) : (V_{mn}) = A'_{mn} - G'_{mn}$$

Deuxièmement, un premier système d'optimisation est modélisé et résolu grâce à un algorithme séquentiel qui permet d'identifier le nombre de nouvelles stations désirées en fonction de trois critères : le ratio coûts-bénéfices, l'indice de couverture spatiale pour assurer une dispersion uniforme des SMR, ainsi que l'indice de robustesse pour assurer une fiabilité minimale du système même si une station venait à mal fonctionner. L'algorithme séquentiel permet de donner un nombre approximatif de stations à déployer pour atteindre une certaine couverture spatiale. Des graphiques des variations des indices sont réalisés en fonction du nombre de stations déployées. Un nombre officiel de stations peut donc être déterminé par les décideurs opérationnels, selon leurs contraintes budgétaires. Dans le cas de cette étude, les auteurs ont décidé eux-mêmes du nombre de stations.

Les trois critères (ratio coûts-bénéfices, indice de couverture spatiale et indice de robustesse) sont formulés de la façon suivante :

$$\text{coût total} = \frac{(N * FC + \sum_i D_{ik} * MC * P)}{P}$$

Où FC représente le coût fixe d'installation d'une SMR ; MC est le coût d'opération et de maintenance pour un an ;  $D_{ik}$  est la distance minimum d'une SMR  $i$  à un centre de service  $k$  ; et  $N$  représente le nombre total de nouvelles SMR à déployer.

$$\text{Indice de couverture spatiale} = \frac{\text{couverture existante}}{\text{couverture maximale}} = \frac{\sum_{mn} \left(1 - \frac{d_{mn}}{\text{range}}\right)}{z}$$

Où  $d_{mn}$  est la distance minimum d'une cellule  $(m, n)$  à la plus proche SMR déjà existante et  $z$  est la couverture maximale des  $N$  stations à déployer. Ici et dans les équations qui suivent, le *range* représente la portée d'une station en termes d'efficacité ; l'auteur considère que l'efficacité d'une station diminue en fonction de la distance linéaire. Dans cette étude, il a été supposé que la portée des SMR était de 20 milles.

$$\text{Indice de robustesse} = \frac{\text{utilité de } (n - 1) \text{ station}}{\text{utilité totale}} = \frac{\sum_i \sum_{m,n} B_{-i mn}}{N * \sum_{m,n} B_{mn}}$$

Où  $B_{mn}$  est l'utilité-bénéfice d'une cellule  $(m, n)$ , en assumant que la  $i^{\text{e}}$  station ne fonctionne pas. Ainsi, un indice de robustesse élevé requiert que les SMR soient placées plus près l'une de l'autre. L'utilité-bénéfice d'une cellule est calculée de la façon suivante :

$$B_{mn} = E_{m'n'} * V_{mn} * \left(1 - \frac{D_{mn}}{\text{range}}\right)$$

Où  $V_{mn}$  représente la vulnérabilité de la cellule  $(m, n)$  ;  $E_{m'n'}$  représente l'efficacité d'une cellule dans laquelle est placée une station  $(m', n')$  ; et  $D_{mn}$  est la distance entre le centre d'une cellule  $(m, n)$  et le centre de la plus proche cellule avec station  $(m', n')$ .

Finalement, une fois que le nombre de stations à déployer est décidé grâce à l'analyse des graphiques résultant de l'algorithme séquentiel, une formule d'optimisation est encore une fois résolue avec des approches heuristiques, dans le but de trouver une solution globale optimale. Le système d'optimisation globale optimal est résolu en utilisant le programme MATLAB. Pour consulter le système d'équations complet et plus détaillé, voir Singh *et al.* (2016)

**f. L'approche d'optimisation à deux niveaux : maximisation de la couverture spatiale et maximisation des coûts-bénéfices**

Chien *et al.* (2014) et Zhao *et al.* (2016) utilisent dans leur étude un modèle d'optimisation basé sur une approche de maximisation de la couverture spatiale ainsi que des coûts-bénéfices grâce à deux fonctions-objectif.

Avant tout, les auteurs ont réalisé un sondage auprès du personnel de maintenance hivernale afin de déterminer des localisations potentielles de stations sur des sites jugés critiques ou problématiques. Ensuite, les auteurs ont développé un modèle pour calculer un indice de sévérité hivernal, afin de représenter les conditions micro météorologiques de la région. Pour ce faire, la région est divisée en petites zones pour lesquelles l'indice de sévérité hivernal est calculé comme suit :

$$S_w = W_1 \cdot \alpha_{w1} + W_2 \cdot \alpha_{w2} + W_3 \cdot \alpha_{w3} + W_4 \cdot \alpha_{w4}$$

Où  $S_w$  représente l'indice ;  $\alpha_{w1}$ ,  $\alpha_{w2}$ ,  $\alpha_{w3}$  et  $\alpha_{w4}$  sont les pondérations associées aux paramètres  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$ , et  $w_4$ , respectivement la température moyenne de surface en hiver, le nombre de semaines avec une température de surface transitionnelle, l'accumulation moyenne annuelle de neige ainsi que la durée moyenne annuelle de pluie verglaçante.

Grâce au calcul de l'indice de sévérité hivernale et à la cartographie de ce dernier, les auteurs peuvent analyser la variabilité spatiale météorologique de la région. Plus la variabilité spatiale météorologique est faible, plus la distance tolérée entre deux stations peut être élevée. Ainsi, une zone de couverture est calculée pour chaque site potentiel de station (voir Chien *et al.*, 2014 ou Zhao *et al.*, 2016 pour plus de détails). Si deux sites sont près l'un de l'autre, leurs zones de couverture peuvent se chevaucher. L'objectif des auteurs est donc ensuite de trouver un nombre minimum de sites pour lesquels la couverture spatiale totale est maximisée. Le modèle à fonction-objectif pour maximiser la couverture spatiale de la zone d'intérêt est le suivant :

$$MaxS_T = \sum_i x_i A_i - \frac{\sum_i \sum_j x_i x_j O_{ij}}{2}$$

Où  $S_T$  représente la sommation des zones couvertes ;  $A_i$  représente une zone de couverture associée à un site  $i$  ;  $O_{ij}$  représente une zone de chevauchement entre les sites  $i$  et  $j$  ;  $x_i$  et  $x_j$  représentent des variables binaires de décision.

Finalement, un modèle de contrainte budgétaire est développé pour raffiner les résultats obtenus de la première fonction-objectif. Le but est de prioriser les sites soumis à des contraintes budgétaires, parmi les sites potentiels résultant de la fonction de couverture spatiale. Chaque site potentiel est associé à une valeur unique de bénéfice relié à la diminution des accidents et du trafic, ainsi que de coût, incluant l'installation initiale, la maintenance annuelle et les améliorations des instruments. Ainsi,

$$Max\pi_T = \sum_k x_k (B_k - C_k) - \frac{\sum_k \sum_l x_k x_l B_{kl}^O}{2}$$

Où  $\pi_T$  est le profit total objectif, soit le coût total soustrait au bénéfice total, moins le bénéfice des zones de chevauchement ;  $B_k$  et  $C_k$  sont respectivement les bénéfices et les coûts associés à un

site  $k$  où  $k \in K$ ,  $K$  étant une combinaison de sites potentiels résultant de la fonction de maximisation de la couverture spatiale ;  $x_k$  est une variable binaire de décision ; et finalement  $B^o_{kl}$  est le bénéfice surestimé dans une zone de chevauchement entre un site  $k$  et un site  $l$ .

Comme pour le modèle de Zhao *et al.* (2015), la sommation des coûts totaux à chaque site  $k$  doit être plus petite ou égal au budget total. Pour analyser les systèmes d'équations complets permettant de déterminer les coûts et les bénéfices associés à chaque site, voir Chien *et al.* (2014) ou Zhao *et al.* (2016).

#### **g. L'approche de la fonction multi-objectifs**

Une seule étude (Fetzer *et al.*, 2018) présente un modèle d'optimisation avec une fonction multi-objectifs, contrairement aux autres auteurs qui maximisent ou minimisent une seule fonction-objectif. Les trois objectifs à maximiser sont les suivants : les véhicules-miles parcourus (VMT) à l'intérieur de la portée d'une station, l'aire géographique couverte par la portée des stations, ainsi que l'augmentation potentielle de la sécurité (ou la réduction du nombre d'accidents). À ces objectifs viennent s'ajouter les contraintes de budget, d'accès à l'électricité et de la distance aux stations existantes. Pour la méthode détaillée comportant de nombreuses équations et de nombreux paramètres, voir Fetzer *et al.* (2018).

#### **2.2.2.3. Programmes et logiciels utilisés par les auteurs**

Tous les auteurs mentionnés dans la section précédente utilisent différents logiciels et programmes pour créer et résoudre leurs algorithmes afin de réaliser leurs modèles d'optimisation. Ainsi, Fetzer *et al.* (2018) ont codé leur algorithme contenant une grande quantité de variables et contraintes à l'aide du solveur *CPLEX Optimization Studio* 12.6.3 de IBM avec Java 8. Zhao *et al.* (2016) ont pour leur part programmé et résolu leurs algorithmes avec le logiciel *LINGO 12* alors que Jin *et al.* (2014) et Singh *et al.* (2016) ont utilisé le programme *MATLAB* pour résoudre leurs algorithmes. Walker (2012) crée également des algorithmes avec *MATLAB*, en plus d'utiliser *ArcGIS* et des outils spécifiques de ce dernier comme *Eclipse* et *ArcObjects*. Laurinavicus *et al.* (2007) ont utilisé *Microsoft Access* pour traiter leurs données. Kwon *et al.* (2013) ont quant à eux utilisé une combinaison de *ArcGIS* comme plateforme de base ainsi que *SPSS* pour résoudre les régressions linéaires multiples, alors que Kwon *et al.* (2016 et 2017) ont utilisé une combinaison de *SIG* et du programme *R*. Zhao *et al.* (2015) ont pour leur

part réalisé leur optimisation principalement avec ArcGIS 10.0 ainsi que le programme *LINGO 9*. Pinet et Lo (2003), Pinet (2009) et Chien *et al.* (2014) mentionnent simplement avoir utilisé des outils de systèmes d'informations géographiques (SIG ou GIS) comme ArcGIS. Finalement, Kwon *et al.* (2014) et Kwon et Fu (2016) ont utilisé les logiciels ArcGIS 10.1 et QGIS 1.8.

### **2.3. Conclusion : Revue de littérature**

En ce qui concerne le premier objectif, l'examen de la littérature a révélé que chaque méthode présente des avantages et des inconvénients, qui sont à analyser en fonction des besoins de l'étude : nombre de variables, nombre approximatif de grappes souhaité, ressources en termes de temps et de matériel informatique, etc. Par exemple, selon Jolliffe et Philipp (2010), lorsque le nombre de grappes souhaité est beaucoup plus petit que le nombre d'objets qui sont à regrouper, comme c'est le cas pour ce projet, il est alors préférable d'utiliser une technique hiérarchique de division plutôt qu'une technique hiérarchique d'agglomération. En effet, comme au départ tous les objets sont dans une seule grappe qui se subdivise ensuite en d'autres grappes à chaque étape de l'algorithme, alors moins d'étapes sont nécessaires pour atteindre le niveau de dendrogramme souhaité, contrairement à l'agglomération. Cela est notamment avantageux sur le plan informatique. Pour Azam *et al.* (2018), c'est une combinaison d'algorithmes de classification hiérarchique et non hiérarchique qui permet une plus grande robustesse dans les résultats.

Comme aucune étude ne correspond précisément au contexte de la problématique de notre projet, plusieurs méthodes relevées dans la littérature scientifique seront testées afin d'analyser celle qui répond le plus aux besoins de cette recherche. Les méthodes testées seront également choisies en fonction des ressources disponibles sur le plan informatique. Il va de soi que les méthodes testées en premier seront celles réalisables grâce aux outils ArcGIS de la compagnie ESRI, puisque l'Université Laval possède une licence de ces produits. Des méthodes disponibles grâce à d'autres programmes pourraient être testées, par exemple des algorithmes exprimés en langage R ou Python, de même que GeoDa ou Matlab.

Au niveau des variables à intégrer, il faudra d'abord procéder à une recherche pour déterminer quels types de variables et de jeux de données sont accessibles pour ce projet, dans une échelle temporelle et une résolution spatiale adéquates. Il faudra aussi évaluer la qualité de ces données et procéder à des mesures de prétraitement au besoin (interpolation, standardisation, etc.). Il est également possible que l'utilisation de certaines variables pour l'objectif 1 soit inspirée de variables utilisées dans les documents trouvés pour l'objectif 2.

En ce qui est du deuxième objectif du projet, l'analyse documentaire a montré que l'approche heuristique des mesures substitutives utilisées par Kwon et Fu (2016, 2013), qui intègre des paramètres liés à la météorologie et au trafic, est surtout utile pour déterminer si un réseau de SMR déjà implanté dans une région offre une couverture efficace de cette dernière. Comme l'objectif de notre projet n'est pas d'analyser la couverture actuelle des stations météo-routières, mais bien de trouver des emplacements optimaux pour l'ajout de nouvelles stations, cette méthode n'est pas celle que nous devrions préconiser.

Par ailleurs, plusieurs méthodologies trouvées dans la littérature prennent en compte des paramètres liés aux coûts des stations, que ce soit l'installation ou la maintenance annuelle, ou au budget total disponible (Chien *et al.*, 2014; Kwon *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2015; Kwon et Fu, 2016; Singh *et al.*, 2016; Zhao *et al.*, 2016). Comme nous n'avons pas ce genre d'information pour le Québec au moment d'écrire ce rapport, nous n'envisageons pas de tester les méthodes ou certaines parties de méthode impliquant des contraintes budgétaires pour ce projet de recherche.

L'approche des mesures substitutives de Kwon et Fu (2013) et Kwon *et al.* (2013) pourrait être testée par notre équipe, tout comme l'approche de minimisation des taux d'accidents dans de mauvaises conditions météorologiques de Walker (2012) et Jin *et al.* (2014), ainsi que l'approche des erreurs d'estimation spatiale de Kwon *et al.* (2016 et 2017). D'ailleurs, cette dernière approche est, selon les auteurs, très efficace pour évaluer la couverture d'un réseau de SMR déjà existant ainsi que pour délimiter de nouvelles localisations de stations. Les auteurs proposent cependant d'utiliser d'autres variantes de la méthode du krigeage, comme la régression-krigeage ou le krigeage universel, qui offriraient des résultats plus détaillés.

Évidemment, pour ce faire, il faudra d'abord effectuer une recherche pour déterminer quels types de variables et de jeux de données sont aisément disponibles pour le Québec, dans une échelle temporelle et une résolution spatiale adéquates, surtout en ce qui a trait aux variables liées aux accidents.

### **3. CHAPITRE 2 : DÉTERMINATION DES ZCH**

---

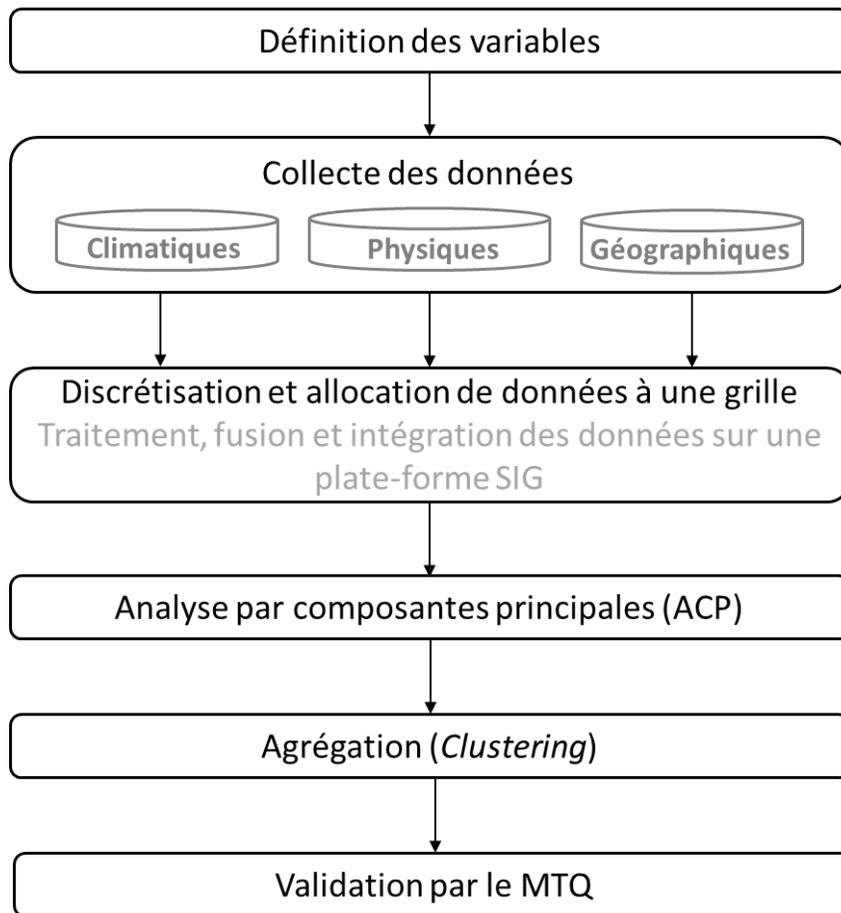
Le premier objectif consiste à proposer un découpage du réseau routier du MTQ en zones homogènes suivant une approche basée sur une démarche scientifique. D'après notre première analyse, le MTQ dispose d'un ancien zonage (ZCH) dont la réalisation était possiblement fondée sur des techniques plus subjectives, et ce en collaboration avec des météorologues d'Environnement Canada ainsi qu'en tenant compte des connaissances et de l'expertise du personnel opérationnel du MTQ (Arsenault, 2007).

D'après la recherche documentaire réalisée en amont, jusqu'à présent aucune étude scientifique associée spécifiquement à l'entretien d'un réseau routier ne présentait de méthodes pour créer des zones homogènes en tenant compte de plusieurs paramètres (météorologiques, environnementaux, etc.). De plus, l'originalité du présent travail consiste à utiliser la plus fine échelle spatiotemporelle disponible pour réaliser un découpage en zones homogènes conditionné par divers facteurs.

De nos jours, avec le développement des moyens de calcul, l'analyse des données permettant de traiter des tableaux de grande dimension, mais aussi grâce à l'utilisation d'algorithmes de classification automatique performants, il est de plus en plus facile d'analyser les données représentant de gros volumes. Ce chapitre s'attardera à décrire un tel cheminement méthodologique adopté par la présente étude pour la détermination des ZCH.

### **3.1. Méthodologie préconisée**

Dans cette section, la méthodologie adoptée pour effectuer l'analyse est brièvement décrite dans l'organigramme de la figure 7. Comme le montre la figure, nous avons commencé par examiner divers facteurs importants devant être pris en compte dans le processus afin d'identifier les variables sur lesquelles portera notre analyse. Une fois la liste des variables définie, nous avons procédé à la recherche et la collecte de données existantes à l'échelle spatiotemporelle la plus fine disponible. Par la suite, et afin de réduire la complexité des calculs, la zone d'étude a été divisée en une grille de cellules de taille égale. En utilisant la taille appropriée, une grille couvrant toute la zone d'étude fut créée. Ceci peut être justifié par le fait que la structuration du problème d'une façon discrète permet non seulement d'augmenter l'efficacité du calcul, mais aussi d'assimiler une grande quantité de données. Avant de passer à la prochaine étape, et dans le but de minimiser la variabilité spatiale des paramètres analysés, nous avons donc créé une zone tampon de 25 km de part et d'autre du réseau routier, cette zone a été superposée à la grille de sorte que seules les cellules qui y sont contenues peuvent être sélectionnées pour une analyse plus approfondie.



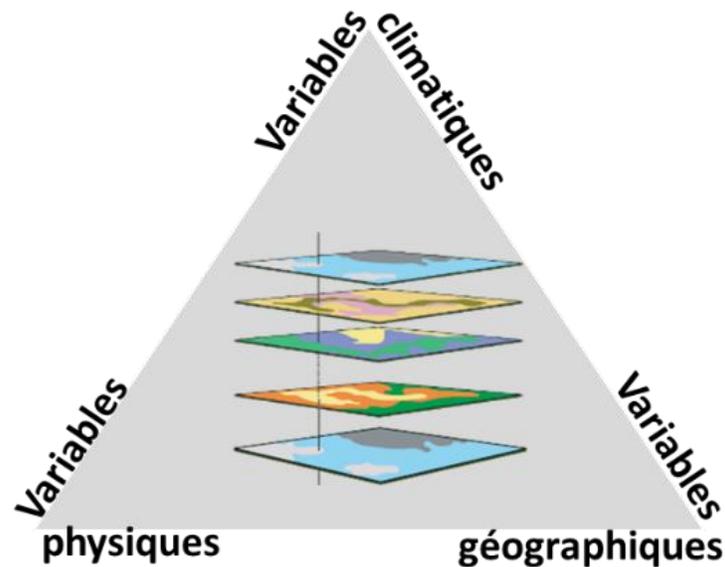
**Figure 7** Organigramme décrivant la méthodologie adoptée

### 3.1.1. Variables

L'objectif du zonage est d'obtenir un découpage du réseau routier en zones homogènes à l'intérieur desquelles le comportement des paramètres considérés est similaire. Pour définir une zone climatique homogène (ZCH), on peut, bien entendu, se restreindre à l'étude des seuls paramètres climatiques. Cependant, dans le cas de la présente étude, d'autres paramètres présentant un intérêt majeur ont été retenus.

La liste des variables a été déterminée à la suite de la revue de la littérature et selon la disponibilité des données puis a été validée par le MTQ. Comme le montre la figure 8, trois

catégories de données étaient nécessaires pour atteindre l'objectif de cette première étape, à savoir les données météorologiques, physiques et géographiques.



**Figure 8 Catégories des variables utilisées**

Les variables climatiques utilisées dans cette étude comprennent les températures minimale et maximale ainsi que les précipitations, en utilisant des données pluriannuelles, tandis que les variables physiques sont définies par l'altitude (élévation) et la distance à un plan d'eau. Les variables géographiques quant à elles concernent la latitude et la longitude. Le choix de ces variables peut être justifié par le fait que la latitude devrait affecter la variation spatiale de la température, tandis que la longitude peut capter l'influence des vents. L'altitude en mètres au-dessus du niveau moyen de la mer est incluse pour décrire la topographie à proximité du réseau routier et pourrait être liée à la variation de la température. Par exemple, plus l'altitude est élevée, plus la température est basse et plus les précipitations peuvent être abondantes. Enfin la distance des grands plans d'eau exprimée en distance euclidienne représente le degré de continentalité.

### 3.1.2. Description des données

La distribution des données climatiques (les quantités de précipitations, les températures minimale et maximale) doit être soigneusement étudiée, et ceci pour déterminer les régions susceptibles d'être homogènes sur le plan climatique afin que les recommandations pour les points de prévisions puissent être faites en conséquence. Cela peut être effectué en analysant les observations de données climatiques historiques à long terme. Le réseau de stations météorologiques du Québec, constitué de stations séparées de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres, fournit des observations horaires. Ce réseau, qui compte près de 329 stations fournit des données sur la température et les précipitations (MELCCQ<sup>1</sup>). Les séries de mesures correspondantes sont relativement longues. Ces réseaux ne seront cependant pas pris en compte dans notre étude, car leur utilisation nécessite des calculs d'extrapolation et d'interpolation pour pouvoir couvrir l'ensemble de la zone d'étude.

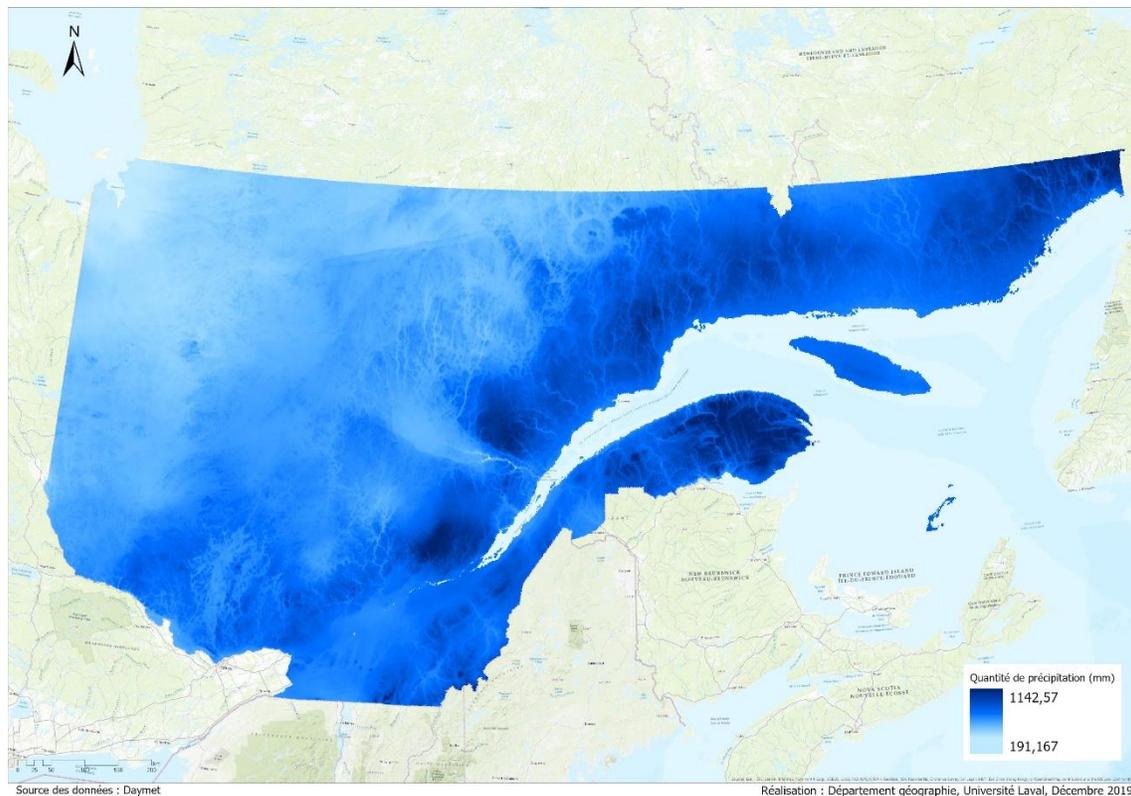
*Daymet* est une archive de données météorologiques en ligne, qui est une collection d'estimations maillées des paramètres météorologiques générés par interpolation et extrapolation à partir d'observations météorologiques quotidiennes. *Daymet* fournit des résumés météorologiques et climatologiques quotidiens destinés au grand public sur une grille de 1 km x 1 km. Les variables disponibles sont : la température (minimale et maximale), la radiation solaire, la pression de vapeur, l'équivalent en eau de neige, les précipitations et la durée du jour ([Site officiel de Daymet](#)). La grande qualité des données *Daymet* rend inutile l'utilisation des données du MELCCQ qui nécessiterait des traitements complexes, longs et coûteux. Les cartes sommaires annuelles moyennes de précipitation,  $T_{\min}$  et  $T_{\max}$  sont obtenues pour une période de 30 ans (1988 et 2018) couvrant l'ensemble du réseau routier du MTQ.

Les fichiers *Daymet* sont dans un format NetCDF (*Network Common Data Form*), format couramment utilisé dans des applications de climatologie dans lequel chaque variable est affichée à l'aide d'une dimension telle que le temps (l'année, le mois ou le jour). Le recours au langage R s'est donc avéré nécessaire pour le téléchargement et le traitement en lot des données par la suite. La figure 9 illustre la répartition des précipitations calculées sur un historique de 30 ans (1988-2018), il s'agit bien de la moyenne des précipitations cumulées des mois de la période

---

<sup>1</sup> Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec

hivernale (Nov-Dec-Jan-Fev-Mar-Avr) considérée dans nos hypothèses de base. Sur cette carte on peut voir que les régions plus élevées de l'est reçoivent plus de précipitations (en particulier sous forme de neige), et les quantités diminuent progressivement vers l'ouest (souvent moins élevées). Dans le secteur nord-ouest, les précipitations diminuent de manière appréciable puisque les températures y sont plus froides et que l'air froid contient moins d'humidité.



**Figure 9 Répartition des précipitations calculées sur un historique de 30 ans (1988-2018)**

En ce qui concerne les variables physiques, le modèle numérique de terrain (MNT) avec une résolution spatiale de 1 km x 1 km ainsi que l'hydrographie, y compris les grands lacs et la mer, sont utilisés pour obtenir les informations auxiliaires susmentionnées. Il y a lieu de mentionner que pour l'hydrographie, nous n'avons conservé pour l'analyse que les grands plans d'eau, c'est-à-dire ayant une superficie supérieure à 30 000 hectares. Pour ce qui est des variables géographiques (latitude, longitude), nous avons créé des couches en calculant les

OPTIMISATION DES ZCH ET DU RÉSEAU DE STATIONS DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRES POUR LES DÉCIDEURS OPÉRATIONNELS EN ENTRETIEN HIVERNAL DU RÉSEAU ROUTIER DU MTQ

coordonnées des centroïdes des cellules de notre grille de base. Les sources des données utilisées sont décrites dans le tableau 3.

**Tableau 3 : Sources des données utilisées**

	Données	Unité	Référence spatiale	Résolution	Producteur	Format	Période couverte
Données climatiques	T°min journalière	°C	WGS_1984	1km x 1km	NASA (Daymet)	NetCDF	1988 à 2018 (30 ans)
	T°max journalière	°C	WGS_1984	1km x 1km	NASA (Daymet)	NetCDF	1988 à 2018 (30 ans)
	Précipitations journalières	mm	WGS_1984	1km x 1km	NASA (Daymet)	NetCDF	1988 à 2018 (30 ans)
Données physiques	Hydrographie linéaire		NAD83		Données ouvertes Canada	Shapefile	-
	Hydrographie surfacique		NAD83		Données ouvertes Canada	Shapefile	-
	MNT (Élévation)	m	NAD83	1km x 1km	Données ouvertes Canada	Raster GeoTIFF	-
Données géographiques	Latitude	m	NAD83	Centroïde		Shapefile	-
	Longitude	m	NAD83	grille 1km x 1km		Shapefile	-

Notez que les sept variables ont été standardisées dans une plage de 0 à 1 pour éliminer tout biais potentiel lié aux unités de mesure, mais également pour les ramener à une même échelle (figure 10). Techniquement, la standardisation de type *Min-Max Rescaling Transformation* consiste à transformer les données en soustrayant à chaque valeur, la valeur minimale de la grille et en la divisant par l'écart entre les valeurs maximale et minimale (Barrette *et al.*, 2018). Lors de la standardisation des variables, les données peuvent être transformées comme suit :

$$x_{Stand} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

La description sommaire des prétraitements réalisés sur les données initiales est résumée dans le tableau 4.

**Tableau 4 : Tableau récapitulatif des prétraitements réalisés**

<b>Variables</b>	<b>Prétraitement</b>
<b>Précipitation</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Téléchargement des fichiers NetCDF puis conversion en format GeoTIFF</li> <li>2. Transformation de la dimension journalière en mensuelle (moyenne pour les températures et somme pour les précipitations)</li> <li>3. Calcul de la moyenne des 6 mois d'hiver pour toutes les années pour obtenir un seul raster</li> <li>4. Standardisation</li> </ol> <p><b>Stockage :</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Au total 46 tuiles x 30 ans x 3 variables = 4140 tuiles</li> <li>• 1 tuile NetCDF = 68 Mo en moyenne (~ 281 Go pour l'ensemble)</li> </ul> <p><b>N.B :</b> Les étapes 1 et 2 ont été réalisées moyennant un script R</p>
<b>Température minimale</b>	
<b>Température maximale</b>	
<b>Hydrographie</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Téléchargement</li> <li>2. Sélection des grands plans d'eau pour diminuer la densité de la couche</li> <li>3. Fusion des couches hydrographiques linéaires et surfaciques</li> <li>4. Calcul de la distance euclidienne à un plan d'eau</li> <li>5. Standardisation</li> </ol>
<b>MNT</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Téléchargement</li> <li>2. Ré-échantillonnage</li> <li>3. Standardisation</li> </ol>
<b>Latitude</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Calcul des coordonnées des centroïdes des cellules de la grille de base (1 km x 1 km)</li> <li>2. Standardisation</li> </ol>
<b>Longitude</b>	

# OPTIMISATION DES ZCH ET DU RÉSEAU DE STATIONS DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRES POUR LES DÉCIDEURS OPÉRATIONNELS EN ENTRETIEN HIVERNAL DU RÉSEAU ROUTIER DU MTQ

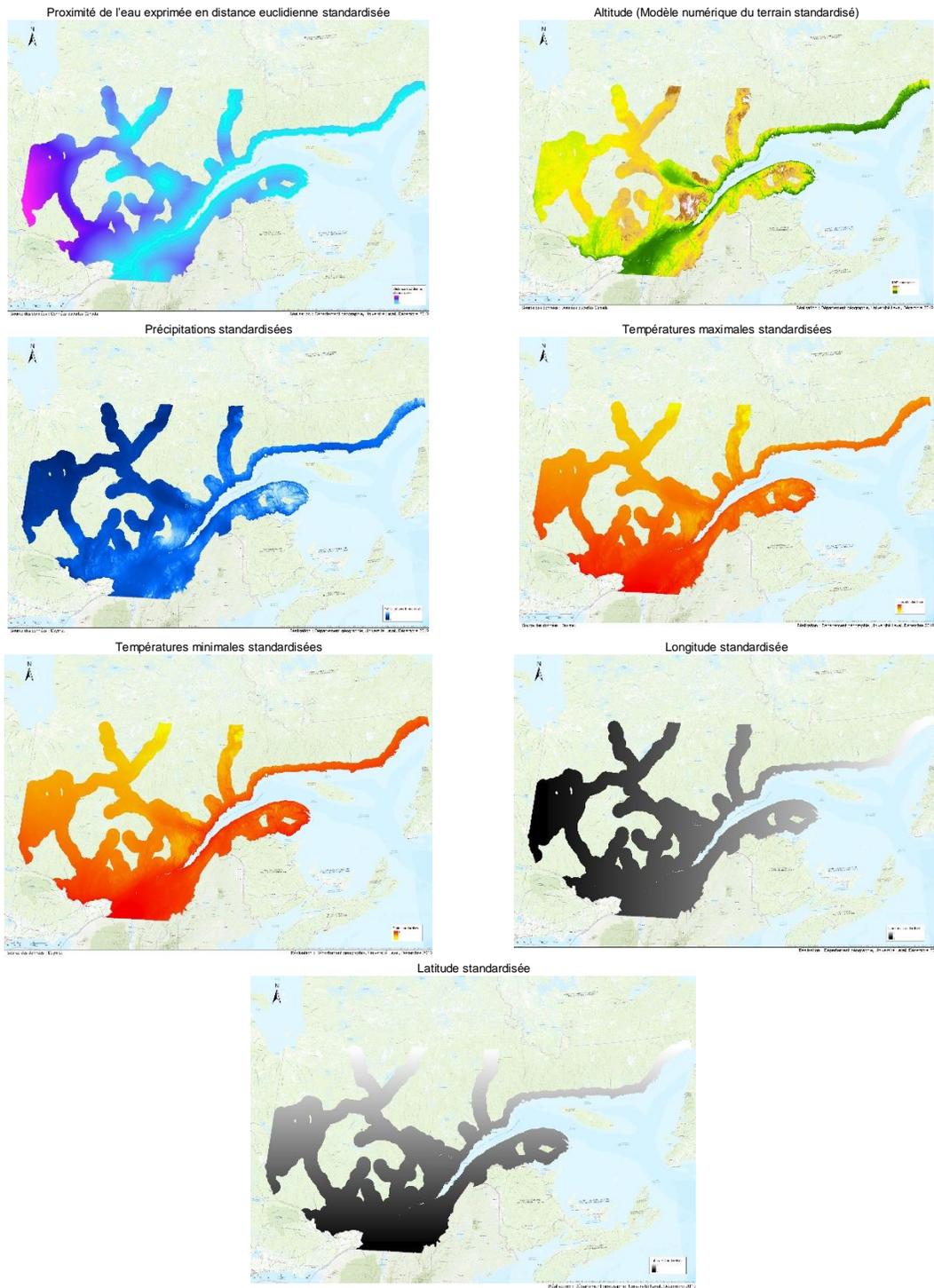


Figure 10 Liste des variables standardisées

### 3.1.3. Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales est une méthode de réduction de dimensions. Plus précisément, il s'agit d'une procédure statistique qui permet de réduire des variables corrélées à des variables non corrélées entre elles, appelées composantes principales. Pour ce faire, une transformation linéaire impliquant des matrices de covariance et de corrélation est réalisée. Ces nouvelles variables latentes contiennent les informations essentielles des variables initiales (Jolliffe, 2002). Dans la présente étude, nos trois catégories de variables préalablement définies jouent le rôle de variables de départ et les composantes principales obtenues représentent les nouvelles variables orthogonales non corrélées sur lesquelles portera l'analyse (figure 11).

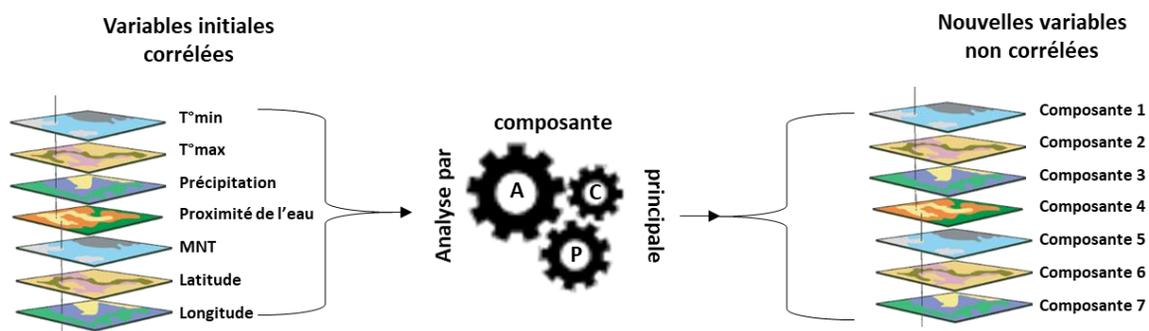


Figure 11 Analyse par composantes principales

### 3.1.4. Agrégation

#### 3.1.4.1. Tests réalisés

Après avoir examiné divers facteurs importants devant être pris en compte dans le processus d'agrégation, plusieurs algorithmes d'agrégation ont été testés afin de proposer un zonage homogène. Les outils et algorithmes testés sont les suivants :

- Classification de Grappe Iso non assistée (Classification K-moyenne suivie d'une classification de vraisemblance maximale) (ArcGis Pro)

- Agrégation multivariée spatialement contrainte (ArcGis Pro)
- Classification par la méthode des K-moyenne (R Studio)
- Classification avec l'algorithme Clara<sup>2</sup> (R Studio)
- Classification supervisée avec l'algorithme forêt aléatoire (RandomForest) (R Studio)

Ces algorithmes diffèrent par leurs hypothèses de base, leurs besoins en données et leur complexité de calcul. Cependant, chacun d'eux est formulé de façon à classer des données suivant des techniques d'agrégation différentes.

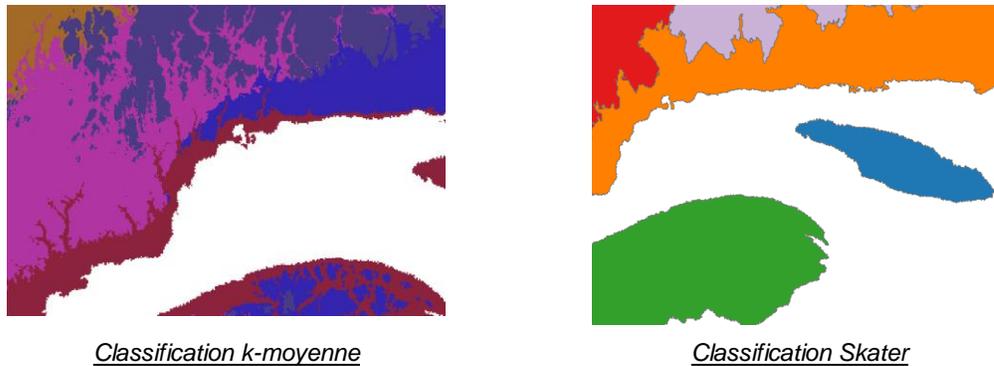
Tous les tests ont été effectués sur un ordinateur performant nouvellement acquis pour le projet. Il s'agit bien d'un ordinateur sous Windows équipé d'un processeur *Intel(R) Core (TM) i7* (3.6 GHz) et d'une mémoire vive de 32 Go. Une partie des tests a été développée sous R, plus particulièrement dans *RStudio* version 1.2.5019. Toute la documentation des librairies utilisées se trouve sur [RDocumentation](#). Nous avons utilisé différentes librairies pertinentes pour préparer les données, mais aussi pour effectuer les tests de classification telles que les librairies "*raster*", "*cluster*", "*randomForest*", "*sp*", "*maps*", "*rgdal*" et plusieurs autres. Trois algorithmes de classification ont été testés dans *RStudio*. La première méthode de classification est la méthode bien connue des k-moyennes, elle sépare n observations en k grappes, chaque observation appartient à la grappe ayant la moyenne la plus proche. La deuxième méthode de classification est appelée Clara (Clustering for Large Applications), elle procède en regroupant uniquement un échantillon de l'ensemble de données, puis attribue tous les objets de l'ensemble de données aux grappes (*cluster*). La troisième méthode utilise un modèle de forêt aléatoire (*RandomForest*) pour calculer les valeurs de proximité. Ces valeurs ont été regroupées à l'aide de la méthode des K-moyennes. Les grappes sont utilisées pour former un autre modèle de forêt aléatoire pour la classification (les étapes des algorithmes testés ont été décrites dans la revue de la littérature). L'autre partie des tests a été réalisée dans *ArcGIS Pro*.

D'après les tests qui ont été réalisés pour le premier objectif, on peut conclure que la méthode d'agrégation multivariée spatialement contrainte basée sur l'algorithme *Skater* (dans ArcGis Pro) donne des résultats beaucoup plus appropriés à notre problématique que les autres

---

<sup>2</sup> CLARA « Clustering LARge Applications », c'est un algorithme de partitionnement autour des médoïdes, aussi appelé K-médoïde. Contrairement au barycentre dans la méthode des K-moyennes, qui est un point artificiel, un médoïde est un point qui existe réellement.

méthodes de classification, puisque l'algorithme d'agrégation tient compte de la contrainte spatiale et que les grappes sont délimitées plus nettement (figure 12).



**Figure 12 Comparaison des classifications K-moyenne et SKATER**

#### 3.1.4.2. Agrégation multivariée spatialement contrainte

L'outil Agrégation multivariée spatialement contrainte (Arcgis Pro) est un outil de regroupement qui prend en compte la contrainte de contiguïté spatiale. Cet outil regroupe les éléments à classer en cherchant une solution optimale dans laquelle tous les éléments de chaque groupe seront aussi similaires que possible, et tous les groupes eux-mêmes seront aussi différents que possible ([Site ArcGis Pro](#)). Cet outil utilise un algorithme basé sur le graphe de connectivité appelé couramment l'algorithme de *Skater* (les étapes de cet algorithme ont été décrites dans la revue de la littérature) pour trouver des groupes naturels en fonction de la probabilité d'appartenance d'une entité à un groupe.

L'outil d'agrégation multivariée spatialement contrainte utilise des méthodes de classification automatique non supervisées puisqu'elles ne nécessitent pas un échantillon d'apprentissage pour entraîner la classification ([Site ArcGis Pro](#)).

Le nombre optimal de grappes ou de zones (*cluster*) est déterminé moyennant l'indice de la pseudo-statistique de *Calinski-Harabasz*. Cet indice mesure la similitude à l'intérieur d'un groupe et la différence entre groupes et est calculé par la formule ci-après qui correspond au rapport de la variance intergroupe à la variance intragroupe ([Site ArcGis Pro](#)) :

Où : 
$$R^2 = \frac{SST - SSE}{SST}$$

SST est le reflet des différences entre les agrégats :  $SST = \sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{n_v} (V_{ij}^k - \bar{V}^k)^2$

Et SSE reflète la similitude intra-agrégats :  $SSE = \sum_{i=1}^{n_c} \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{n_v} (V_{ij}^k - \bar{V}_i^k)^2$

$$\frac{R^2}{(n_c - 1)} \Bigg/ \frac{(1 - R^2)}{(n - n_c)}$$

- n : Nombre d'entités
- n<sub>i</sub> : Nombre d'entités dans le *cluster* i
- n<sub>c</sub> : Nombre de clusters
- n<sub>v</sub> : Nombre de variables utilisées pour l'agrégation
- V<sub>ij</sub><sup>k</sup> : valeur de la k<sup>e</sup> variable de la j<sup>e</sup> entité dans le i<sup>e</sup> *cluster*
- $\bar{V}^k$  : la valeur moyenne de la k<sup>e</sup> variable
- $\bar{V}_i^k$  : la valeur moyenne de la k<sup>e</sup> variable dans le i<sup>e</sup> *cluster*

### 3.2. Résultats : Détermination des ZCH

#### 3.2.1. Matrice de corrélation

Cette étape consiste simplement à inspecter la matrice de corrélation qui permet d'obtenir une appréciation générale de la corrélation entre les variables. Dans cette matrice, les éléments hors diagonale peuvent prendre des valeurs faibles ou fortes (en valeur absolue) dépendamment du degré de corrélation entre les variables.

**Tableau 5 : Matrice de corrélation des variables initiales**

CORRELATION MATRIX							
Layer	EucDist	MNT	Prcp	Tmax	Tmin	X	Y
EucDist	1.00000	0.10937	-0.43223	0.02958	-0.14740	-0.70409	-0.10039
MNT	0.10937	1.00000	0.18545	-0.55183	-0.62888	-0.13539	0.14726
Prcp	-0.43223	0.18545	1.00000	0.24763	0.40107	0.64025	-0.25873
Tmax	0.02958	-0.55183	0.24763	1.00000	0.93598	-0.07165	-0.87786
Tmin	-0.14740	-0.62888	0.40107	0.93598	1.00000	0.20994	-0.73204
X	-0.70409	-0.13539	0.64025	-0.07165	0.20994	1.00000	0.30005
Y	-0.10039	0.14726	-0.25873	-0.87786	-0.73204	0.30005	1.00000

En consultant les résultats de la matrice de corrélation de nos variables initiales dans le tableau 5, on peut conclure que certaines variables sont fortement corrélées ( $T_{\min}$  et  $T_{\max}$  : 0,94,  $T_{\max}$  et  $Y$  : -0,88); d'autres moins. Il est dès lors important qu'une analyse en composantes principales (ACP), qui est une méthode de compression de l'information, soit réalisée afin d'obtenir un résumé efficace en un nombre de facteurs réduit puisque les données présentent une certaine redondance.

#### 3.2.2. Résultats de l'ACP et choix des composantes

Les résultats de l'analyse en composantes principales sont illustrés dans le tableau 6. Ce tableau donne un résumé des valeurs propres et de la proportion de variance retenue par les composantes principales. La valeur propre reflète la quantité de variance expliquée par chaque composante principale.

**Tableau 6 : Résultat de l'analyse par composantes principales**

PERCENT AND ACCUMULATIVE EIGENVALUES			
PC Layer	EigenValue	Percent of EigenValues	Accumulative of EigenValues
1	0.03098	45.7307	45.7307
2	0.02377	35.0857	80.8164
3	0.00746	11.0056	91.8220
4	0.00468	6.9047	98.7267
5	0.00057	0.8451	99.5718
6	0.00021	0.3038	99.8756
7	0.00008	0.1244	100.0000

Les valeurs propres sont élevées pour les premiers axes et faibles pour les axes suivants. Autrement dit, les premiers axes correspondent aux directions portant la quantité maximale de variation contenue dans le jeu de données. Par exemple, les trois premiers axes expliquent respectivement 45,73 %, 35 % et 11 % de la variance, et le pourcentage cumulé expliqué est obtenu en ajoutant les proportions successives de variance expliquée. Par conséquent, environ 92 % de la variance totale est expliquée par les trois premiers axes.

Par la suite, nous examinons les valeurs propres afin de déterminer le nombre de composantes principales à conserver à la suite de l'ACP. Il existe plusieurs critères pour sélectionner le nombre d'axes sur lesquels on décide de travailler afin de conserver le maximum d'informations (Jolliffe, 2002). Il faut noter qu'il n'existe pas de méthode objective pour décider du nombre de composantes principales nécessaires dans une analyse donnée. Cela dépend de la nature de l'analyse, du jeu de données et du domaine d'application spécifique (Abdi et Williams, 2010). Techniquement parlant, le critère le plus simple pour choisir le nombre d'axes consiste à garder les premières composantes qui permettent de conserver 80% de l'inertie. Dans notre analyse, selon le tableau 6, les deux premiers axes expliquent 81 % de la variation, il est donc nécessaire selon ce critère de ne travailler que sur ces deux premières composantes principales.

Un autre critère utilisé dans le but de déterminer le nombre de composantes principales à retenir est de choisir les axes dont l'inertie est supérieure à l'inertie moyenne des axes. Pour cette ACP, sept axes sont nécessaires à la restitution de la totalité de l'information, l'inertie moyenne est donc de 1/7, soit environ 14,28 % de l'inertie. Nous pouvons remarquer que les deux premiers

axes ont une inertie supérieure à 14,28 %, puis le 3<sup>e</sup> axe passe à 11 %. Les deux premiers axes sont donc préconisés pour ce critère également.

Finalement, une analyse de classification (*clustering*) sera effectuée sur les deux premiers axes seulement, car ils contiennent 81 % de l'information ce qui correspond aux 80% requis. Le 3<sup>e</sup> axe n'apporte pas beaucoup d'information supplémentaire (+ 11 % en inertie cumulée et inférieure à l'inertie moyenne (14,28 %), son analyse ne serait alors pas pertinente.

### 3.2.3. Résultats de l'analyse de classification (Clustering)

La classification automatique est la plus adaptée à notre problème. Notre choix s'est porté sur une agrégation multivariée spatialement contrainte (*Skater*), à partir des composantes principales retenues à l'étape précédente. La classification obtenue fournit 12 classes parfaitement contigües (figure 13).

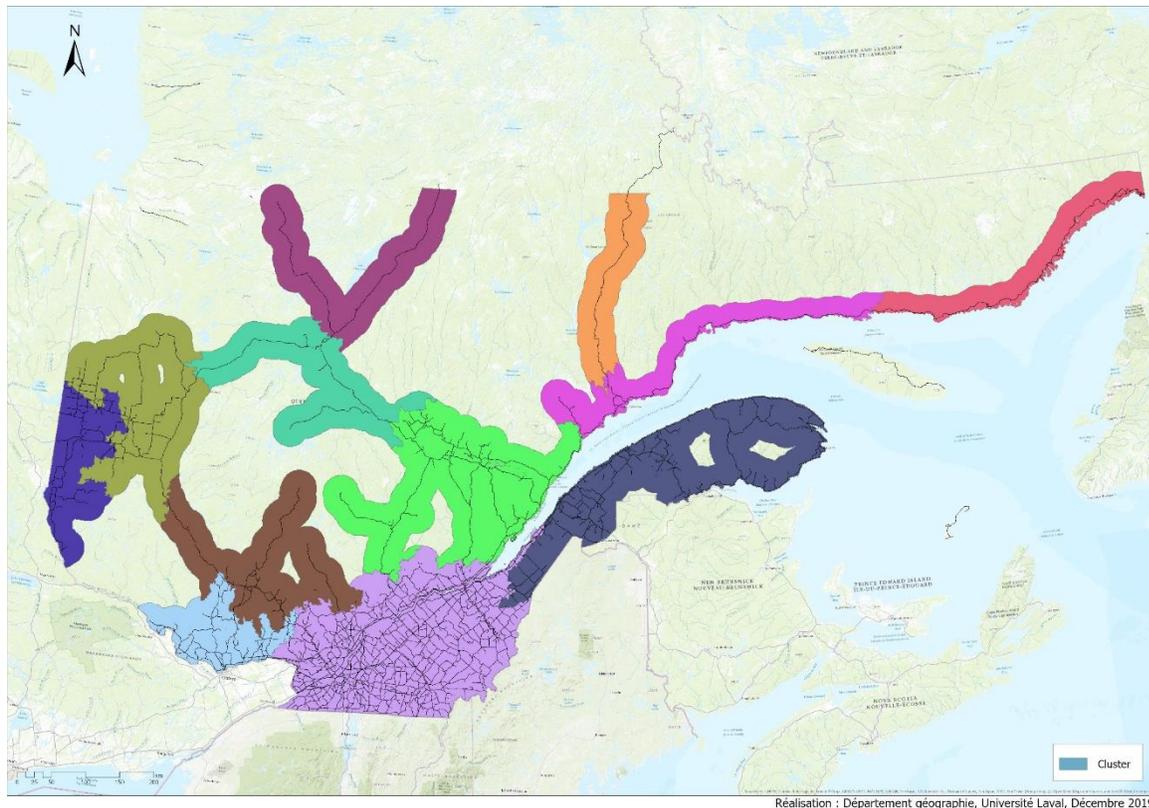
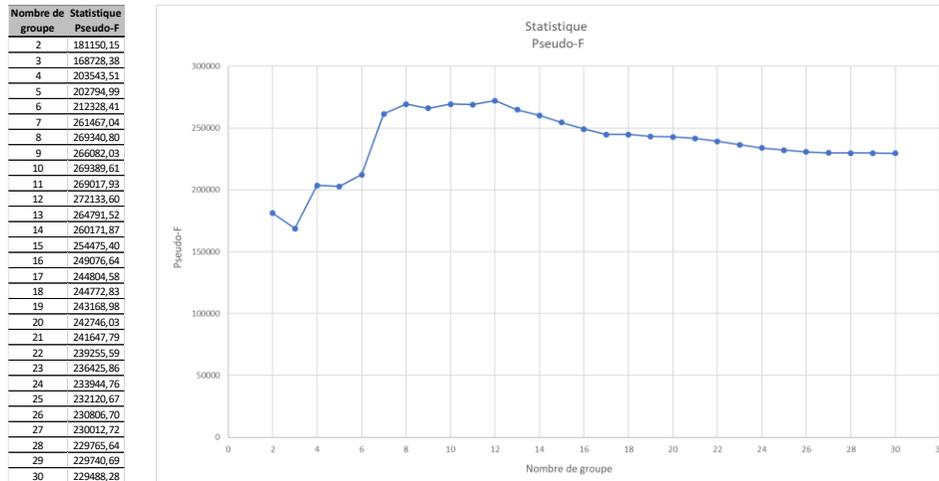


Figure 13 Résultats de la classification initiale : 12 groupes

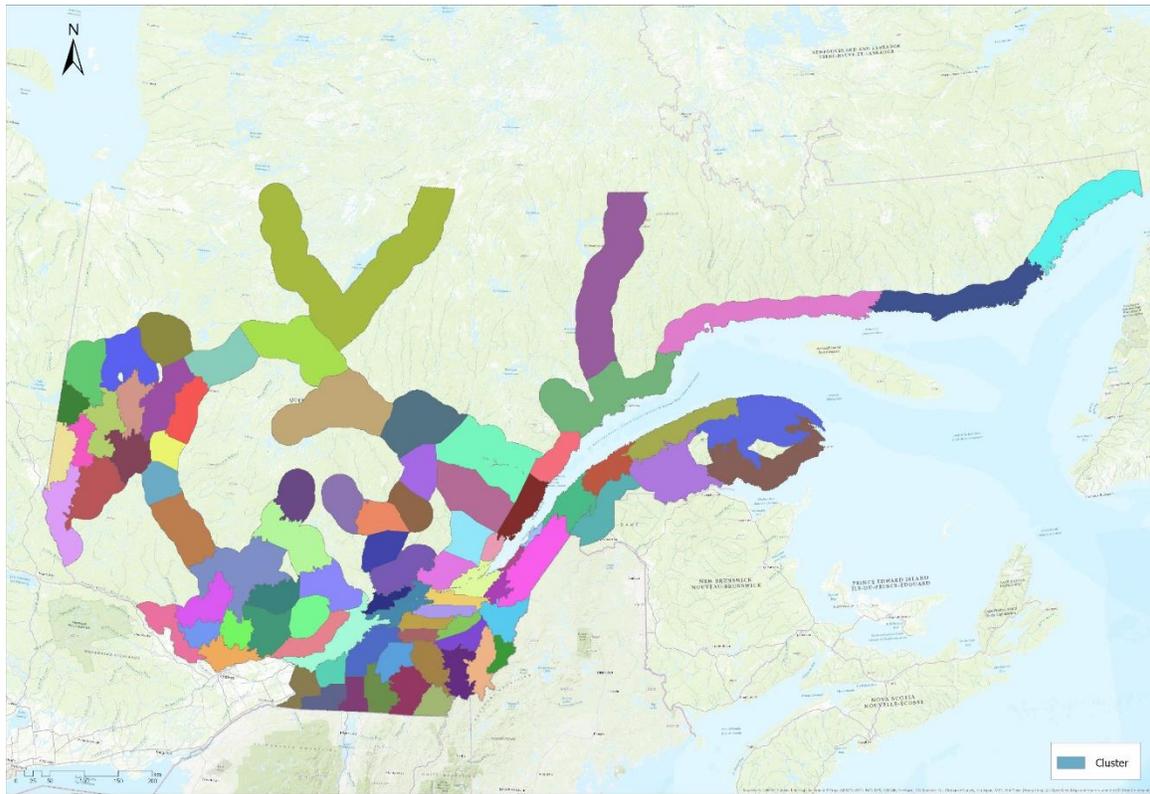
OPTIMISATION DES ZCH ET DU RÉSEAU DE STATIONS DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRES POUR LES DÉCIDEURS OPÉRATIONNELS EN ENTRETIEN HIVERNAL DU RÉSEAU ROUTIER DU MTQ

Le nombre optimal de classes (*cluster*) a été défini automatiquement moyennant la pseudo-statistique de *Calinski-Harabasz* (figure 14).



**Figure 14** Nombre optimal de groupes suivant la pseudo-statistique de *Calinski-Harabasz*

Pour des raisons de gestion, le MTQ souhaite avoir un plus grand nombre de groupes homogènes. En d'autres termes, il a été demandé d'approfondir l'arbre de classification à un niveau plus fin afin de dégager plus d'agrégats contigus et homogènes. Pour ce faire, nous avons convenu de procéder par agrégation à plusieurs niveaux, et d'appliquer à chaque groupe initial un processus d'agrégation successive. Nous avons donc commencé par appliquer à chaque niveau et pour chaque groupe un processus itératif d'agrégation. Ce processus itératif consiste d'abord à standardiser les variables puis réaliser une analyse en composantes principales et choisir le nombre optimal de composantes principales sur lesquelles portera l'analyse et enfin procéder à l'analyse de classification (*clustering*).



**Figure 15 Résultats de la classification à plusieurs niveaux : 88 groupes**

L'agrégation initiale au premier niveau en 12 groupes permet de dégager les grands traits régionaux de la zone d'étude (figure 13). On peut donc conclure que le zonage en 12 agrégats caractérise l'échelle régionale du réseau routier, alors que le zonage effectué à la suite d'une agrégation successive en 88 classes permet de décrire l'échelle plus microscopique.

Après avoir analysé les résultats de l'agrégation successive, il faut noter que plus l'arbre de classification est profond, plus l'algorithme a tendance à fragmenter les classes (*clusters*) présentant une dissimilarité plus élevée, et qu'il y a une certaine subjectivité dans la définition de la profondeur de l'arbre de classification et donc dans le choix du nombre de classes (*cluster*). Autrement dit, l'analyste doit décider du niveau auquel un arrêt de la classification doit être appliqué afin de proposer un zonage (figure 15). C'est à ce niveau qu'intervient l'expertise du personnel du MTQ pour orienter la classification et définir un nombre optimal de classes (*cluster*) en fonction de leur connaissance du terrain et des besoins réels de gestion. Notre choix s'est

porté sur une classification en 88 classes, après avoir utilisé la densité du réseau routier comme critère pour orienter notre classification.

### 3.2.4. Emplacement des points de prévision

Au-delà de son apport pour la définition d'un découpage homogène, le zonage s'avère très utile pour le MTQ dans la mise en place des points de prévision (PDP) nécessaires pour la prédiction des conditions météorologiques routières afin d'optimiser leurs interventions sur le terrain en période hivernale. Une fois que le zonage est établi, le positionnement des PDP peut être défini en tenant compte de deux principaux critères à savoir que chaque ZCH doit se voir assigner un seul point de prévision et que ce dernier doit être accessible par le personnel du MTQ, c'est-à-dire placé sur le réseau routier. Deux méthodes ont été testées pour le positionnement des points de prévision (figure 16), la première consiste à positionner les PDP en calculant les centroïdes de chaque ZCH, puis en les ramenant au plus proche tronçon routier. L'autre méthode consiste à calculer les centroïdes des routes contenues dans chaque ZCH. À ce niveau également intervient l'expertise du personnel sur le terrain du MTQ afin de vérifier la pertinence et la faisabilité de l'emplacement des points surtout en termes d'accessibilité.

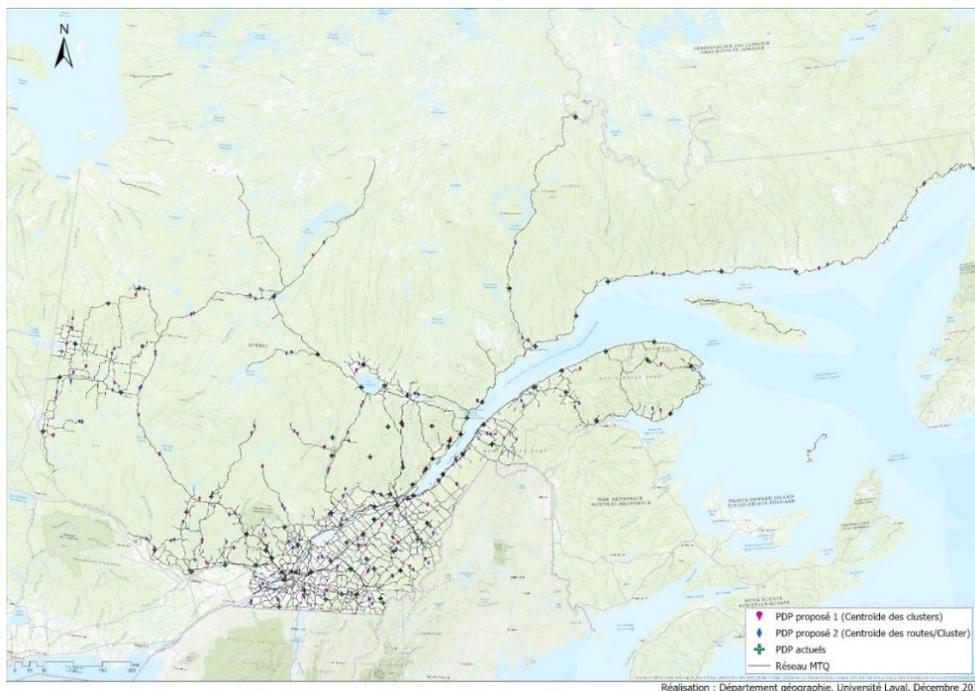


Figure 16 Positionnement proposé des points de prévision

### 3.2.5. Application de cartographie Web

Afin de permettre une interaction avec le personnel du MTQ, les données géographiques issues des analyses de la présente étude ont été mises en ligne via une application de cartographie Web (figure 17). Cette dernière permettra au personnel du MTQ la géovisualisation des résultats en offrant certaines fonctionnalités d'analyse. L'application cartographique a été réalisée moyennant le *Web AppBuilder for ArcGIS*, une solution technologique développée par ESRI dans l'environnement AGOL<sup>3</sup>. Cette solution permet de publier, configurer et personnaliser de façon intuitive des données géospatiales consultables dans des environnements Web couramment utilisés (Barrette *et al.*, 2018).

Le choix de cette technologie peut être justifié par le fait que l'Université Laval dispose d'une licence complète des produits ESRI, avec une possibilité de stockage importante de données géospatiales et que AGOL permet une présentation conviviale de données géospatiales en offrant de multiples fonctionnalités (*widgets*) facilitant la navigation dans les cartes Web et la réalisation d'analyses spatiales simples (Barrette *et al.*, 2018).

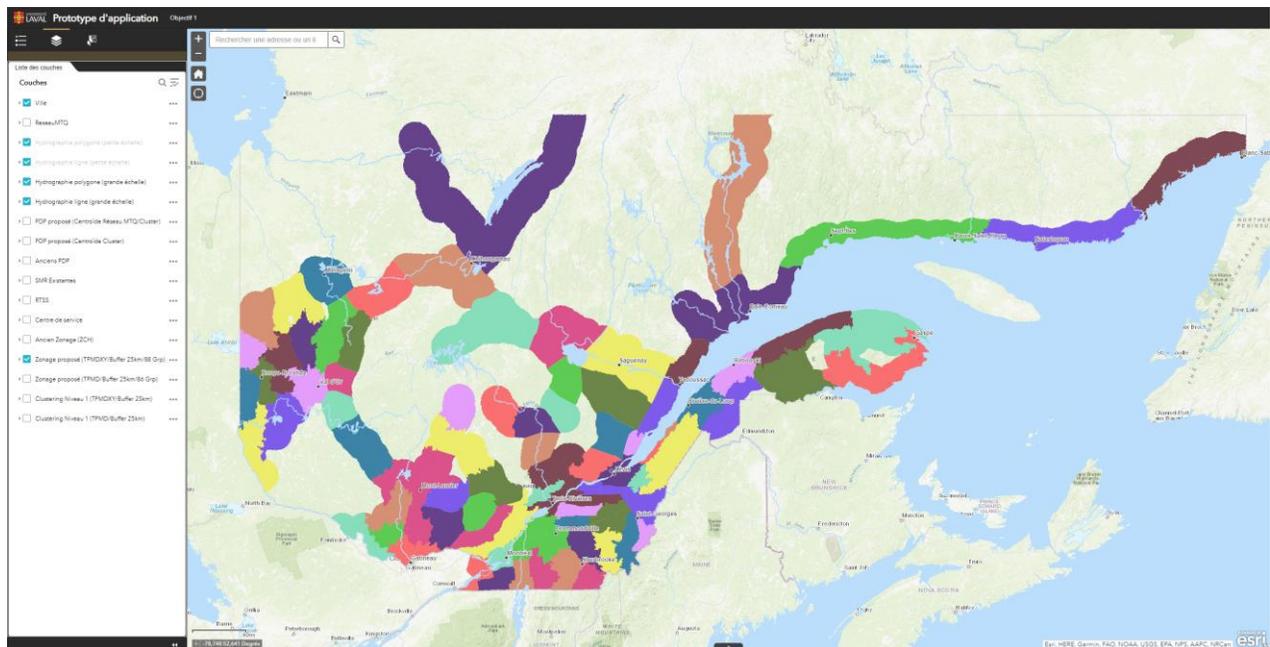


Figure 17 Application de cartographie Web pour le premier objectif ([lien vers application](#))

<sup>3</sup> ArcGis online

### **3.2.6. Validation**

À travers l'étape de validation, nous avons pu exposer l'ensemble des résultats préliminaires de cette étape au MTQ avec pour objectif de déceler les incohérences que l'approche scientifique peut générer et de s'adapter aux contraintes réelles du terrain. Les méthodes d'agrégation qui, par exemple, capturent des variables multiples pour identifier des agrégats homogènes, peuvent réduire la richesse des informations initiales fournies suite aux différentes interpolations et transformations des données sur lesquels ces méthodes sont basées. L'œil expert du personnel du MTQ est fortement sollicité dans cette étape et a permis d'apporter des améliorations importantes sur le résultat final. Deux améliorations y ont été apportées, la première consiste à une opération de lissage pour corriger l'effet escalier des limites des zones qui est dû principalement à la structuration du problème suivant une approche cellulaire, la deuxième consiste à regrouper deux zones identifiées par le MTQ pour des considérations de terrain, le nombre des ZCH est passé à 87 au lieu de 88 définis au départ (voir annexe E). Concernant la localisation des points de prévision, le MTQ a décidé de consulter le personnel opérationnel pour définir la position finale des PDP. Cela est motivé par le fait que la définition d'une localisation ponctuelle exacte d'un PDP peut ne pas convenir dans les applications du monde réel, car il existe souvent d'autres facteurs, comme l'accès et le repérage des PDP sur le terrain. Ces facteurs font également partie des considérations locales, qui doivent être prises en compte avant de décider de l'emplacement exact.

### **3.3. Conclusion : Détermination des ZCH**

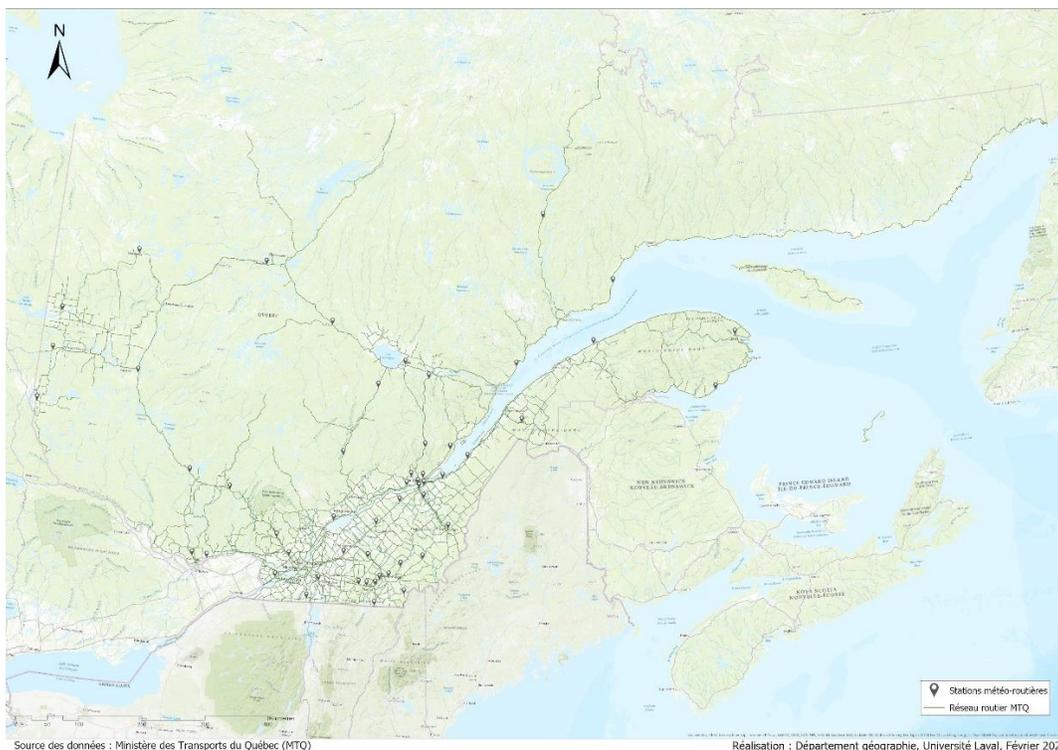
Ce travail a permis, au moyen d'une classification automatique, d'obtenir un zonage en agrégats homogènes en 88 classes, à partir de trois catégories de données à savoir des données météorologiques, physiques et géographiques. Ce zonage permet de décrire des agrégats homogènes à l'intérieur desquels le comportement est similaire vis-à-vis des paramètres considérés. La contiguïté des 88 classes démontre la très forte contrainte spatiale appliquée par l'algorithme utilisé. Le zonage final laisse apparaître des zones à faible variance intragroupe comparées à d'autres présentant une variabilité plus importante, tandis que le zonage initial en 12 classes permettait de retrouver les grandes caractéristiques régionales du réseau. Il faut être conscient du fait que le zonage homogène établi en 87 zones et étudié dans ce projet suppose d'avoir fixé au départ quelques hypothèses, telles que le nombre de variables prises en compte, la durée de la période hivernale considérée et plusieurs autres. La modification de l'une de ces hypothèses entraîne inévitablement des changements dans la configuration du zonage. Le zonage exposé dans ce rapport a servi par la suite à la définition du positionnement des points de prévision selon deux méthodes.

Bien que le découpage proposé soit basé sur une approche scientifique contrairement au premier découpage, plutôt fondé sur une méthode subjective, l'apport de l'expertise du personnel terrain du MTQ reste capital et ne doit pas être exclu à aucun moment du processus, que ce soit pour le zonage ou l'emplacement des points de prévision.

Le MTQ dispose d'un réseau de stations météo-routières déjà existant qui alimente une base de données importante. La richesse de ces données réside surtout dans leur précision et le nombre de variables qu'elles peuvent fournir. Une autre forme de zonage pourrait aussi être effectuée en se basant sur ces mêmes données, mais en couplant des paramètres comme les chutes de neige, la température, le vent et plusieurs autres, tout en nécessitant un grand effort de consolidation préalable à l'exploitation des données.

## 4. CHAPITRE 3 : OPTIMISATION DU RÉSEAU DE SMR

Pendant les mois d'hiver, de nombreuses régions du Québec connaissent une fréquence élevée d'intempéries. Ces conditions météorologiques défavorables peuvent avoir une incidence importante sur la sécurité et la mobilité des usagers de la route. Des informations précises et à jour sur les conditions météorologiques des routes sont donc nécessaires pour le MTQ afin d'atténuer les effets des conditions sévères d'hiver, mais aussi afin d'optimiser les opérations de maintenance hivernale et d'améliorer la sécurité et la mobilité des voyageurs. La station météo-routière (SMR) est un moyen essentiel pour l'acquisition de cette information en temps réel. Une SMR est composée de différents capteurs environnementaux et de chaussée permettant de collecter des données en temps réel sur les précipitations, la température de la chaussée, la neige, etc. Consciente de son importance, le MTQ a mis en place son propre réseau de SMR. Actuellement, le ministère dispose d'un réseau de 53 stations météo-routières (figure 18) qui ont été assignées à une partie du réseau routier au fil des années et envisage de l'étendre sur l'ensemble de son réseau routier (Drouin et al., 2019).



**Figure 18 Réseau des stations météo-routières existant**

Bien que la surveillance permanente du réseau routier du MTQ est indispensable compte tenu de la forte variabilité spatiale des conditions de route et de l'étendue du réseau, l'installation d'une station météo-routière est une opération onéreuse et la décision de choisir un emplacement plutôt qu'un autre doit être prise après une réflexion profonde. Le déploiement des stations ne peut donc être réalisé que dans un nombre d'emplacements restreint, mais suffisant pour couvrir l'ensemble du réseau routier. Elles doivent être placées de la manière la plus optimale possible pour fournir des données précises et fiables au service du personnel du MTQ.

Malgré son réseau important de SMR existant, le MTQ ne dispose pas d'un guide résumant les différentes pratiques pour choisir les emplacements des SMR. Cette étude a tenté de combler cette lacune en examinant divers facteurs importants devant être pris en compte dans le processus de mise en place des futurs SMR et en proposant une approche scientifique pour déterminer leur emplacement optimal sur le réseau routier.

#### **4.1. Méthodologie proposée**

Le cadre général de la méthodologie proposée consiste à formaliser le processus pour choisir les emplacements des stations météo-routières moyennant une analyse multicritère impliquant différents facteurs météorologiques et d'autres liés à la circulation. L'organigramme de la figure 19 fournit une vue d'ensemble de la méthodologie proposée pour la sélection de l'emplacement des futures stations météo-routières. Nous avons commencé par examiner les différents facteurs importants devant être pris en compte dans le processus de sélection de l'emplacement des stations, en partant du principe de base selon lequel la priorité devrait être donnée aux sites les plus exposés aux intempéries et au trafic. Le choix des facteurs d'emplacement est une étape cruciale du projet et qui a fait l'objet de nombreuses réflexions. C'est sur la base de ces facteurs qu'un emplacement pourrait être choisi plutôt qu'un autre. Le choix initial a été fondé principalement sur les résultats de la revue de la littérature alors que le choix final a été dicté par la disponibilité des données.

Ensuite, l'approche est formulée comme un problème d'optimisation discontinue dans lequel une grille de cellules a été appliquée sur la zone d'étude. Seules les cellules contenant le réseau routier sont considérées et présentent les emplacements candidats pour les stations météo-routières. Ces derniers peuvent être classés en utilisant une mesure combinée regroupant l'ensemble des facteurs d'emplacement. Les emplacements ayant les valeurs les plus élevées peuvent ensuite être sélectionnés comme solution optimale.

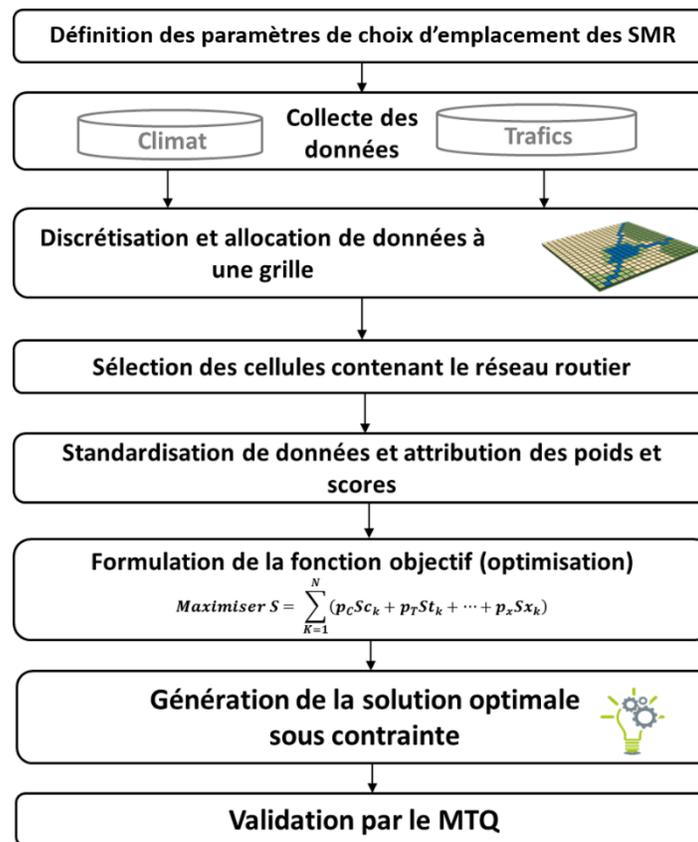


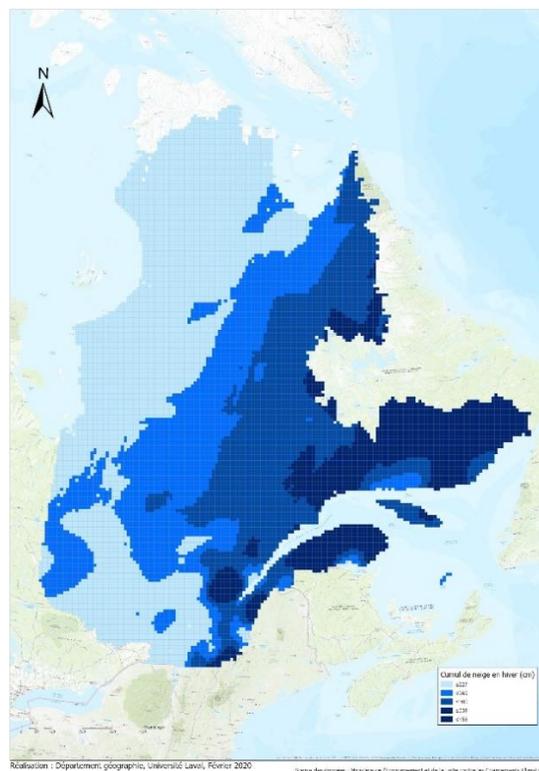
Figure 19 Organigramme décrivant la méthodologie proposée

#### 4.1.1. Paramètres de choix d'emplacement

Les paramètres de choix d'emplacement permettent de mesurer la priorité d'un site par rapport à un autre pour l'implantation d'une station météo-routière, d'où l'importance de les définir clairement. La liste des facteurs d'emplacement a été définie en analysant à la fois les différents facteurs communément utilisés dans la littérature scientifique, mais aussi les besoins exprimés par le ministère. Reconnaisant la complexité du choix, les limites de la disponibilité des données a restreint la liste définitive des paramètres à deux types de mesure pour classer les emplacements candidats, à savoir des mesures liées au climat et d'autres, liées à la circulation.

L'analyse de la distribution des variables climatiques est d'une importance capitale compte tenu du vaste réseau routier du MTQ et de la variabilité spatiale des conditions météorologiques.

L'installation d'un nombre suffisant de SMR est donc nécessaire pour permettre l'acquisition d'informations météorologiques précises et à jour. Ces stations doivent être stratégiquement positionnées pour assurer une surveillance en temps réel en donnant priorité aux endroits soumis à des conditions météorologiques rigoureuses, mais moins prévisibles. La quantité de neige par exemple à un emplacement est un facteur important, dans la mesure où le décideur doit prioriser les zones susceptibles de subir d'importantes chutes de neige. La distribution de la quantité de neige doit faire l'objet d'une analyse approfondie pour déterminer les régions dans lesquelles de fortes chutes de neige risquent de se produire afin que les recommandations relatives au positionnement des futures stations puissent être formulées en conséquence. Cela peut être fait en analysant la carte sommaire du cumul de neige hivernal basée sur les normales 1981-2010 couvrant l'ensemble de la province de Québec, fournie par le MELCCQ<sup>4</sup> (figure 20). Sur la figure 20, on peut voir que les régions de l'est semblent avoir le plus de chutes de neige et que les quantités diminuent progressivement à mesure qu'on se déplace vers l'ouest.

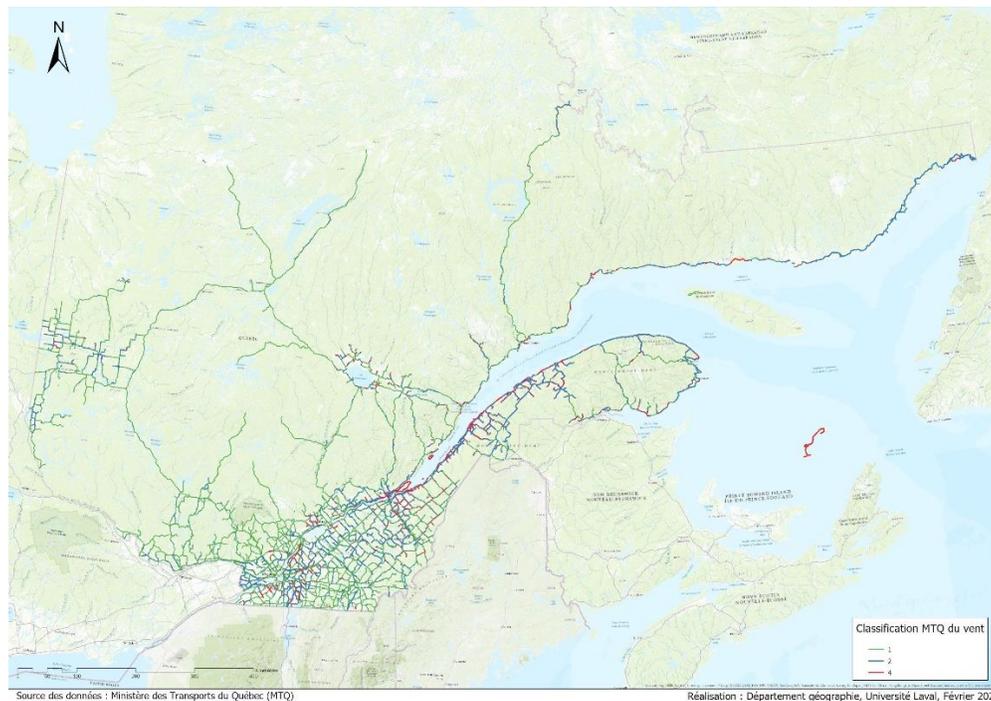


**Figure 20** Carte sommaire du cumul de neige hivernal basé sur les normales 1981-2010

<sup>4</sup> Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques du Québec

La température de surface (TS) est un autre facteur important à prendre en compte. D'après le MTQ, l'usage de ce facteur aurait été priorisé, car elle s'agit d'une mesure quantitative des conditions de surface de la route permettant de détecter les zones historiquement froides susceptibles de créer des conditions de route glissantes à faible adhérence, or cette donnée ne sera probablement disponible que dans les prochaines années. Ce facteur ne sera cependant pas pris en compte dans notre étude. Le facteur vent est un autre critère important à inclure dans notre analyse, par exemple, une zone avec des vents forts le long d'une route peut subir d'importantes accumulations de neige sur la chaussée (MTQ). Il peut être caractérisé par le degré d'exposition de la route au vent. Pour ce critère, nous nous sommes basés sur la classification des tronçons du réseau routier, établie par le MTQ, en fonction du degré d'exposition de la route au vent (figure 21). Selon le guide complémentaire GEH fourni par le MTQ, trois niveaux d'exposition ont été caractérisés dépendamment du degré d'exposition au vent :

- Niveau 1 pour les tronçons peu affectés : il s'agit des tronçons dont les accumulations de neige causées par le vent sont peu nombreuses et peu étendues (présence d'abri naturel comme la forêt, route surélevée sans glissière de sécurité, etc.),
- Niveau 2 pour les tronçons moyennement affectés : il s'agit des tronçons où des remblais de 2 mètres de hauteur peuvent se former durant l'hiver,
- Niveau 3 pour les tronçons très affectés : il s'agit des tronçons perpendiculaires à la direction des vents dominants. Les remblais peuvent dépasser 2 mètres durant l'hiver.



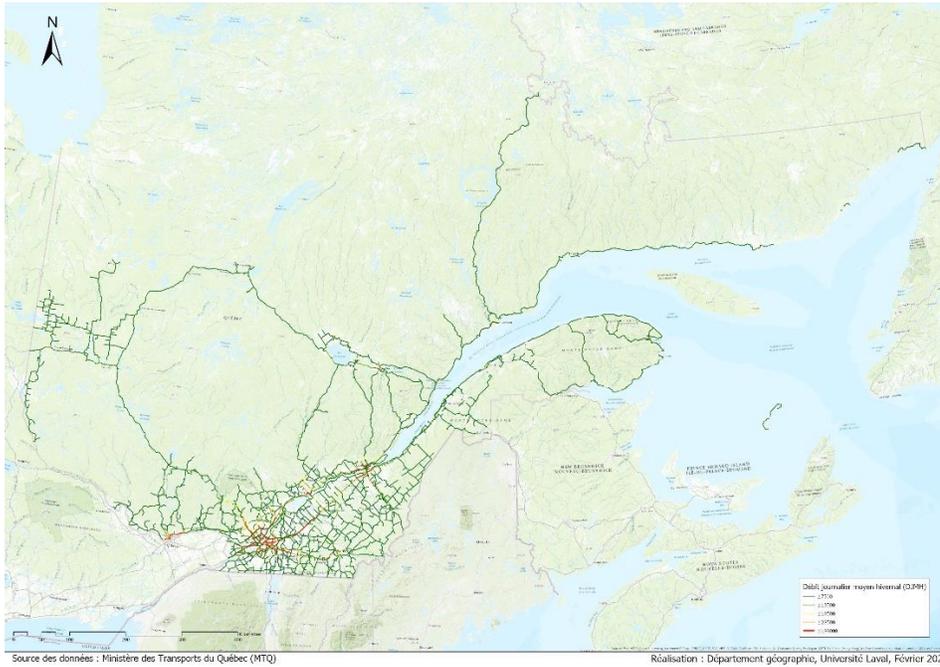
**Figure 21 Classification MTQ du vent**

Un autre facteur important est la proximité d'une source d'humidité locale importante exprimée par la distance du réseau routier par rapport aux étendues d'eau. D'après le MTQ, ce facteur peut créer des conditions de faible visibilité et des températures de surface plus froides.

L'autre catégorie de variables considérées comme critère de localisation concerne les données sur la circulation routière. Comme il a été souligné, les conditions météorologiques défavorables peuvent avoir une incidence importante sur la sécurité et la mobilité des usagers de la route. Par conséquent, une station météo-routière devrait être située dans des endroits où le débit de circulation est élevé, de manière à offrir de plus grands avantages dans des tronçons de route accueillant un plus grand nombre d'usagers. Pour cette raison, des facteurs de circulation, tels que le débit journalier moyen hivernal (DJMH), qui reflète le nombre potentiel d'usagers qui seraient desservis pendant l'hiver, et le nombre d'accidents hivernaux (NAH) ont été collectés et traités pour être mis en œuvre en tant que paramètre de choix d'emplacements des SMR. Les informations sur la circulation ont été obtenues en analysant les données du trafic et les statistiques sur les accidents fournies par le MTQ (figure 22).

# OPTIMISATION DES ZCH ET DU RÉSEAU DE STATIONS DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRES POUR LES DÉCIDEURS OPÉRATIONNELS EN ENTRETIEN HIVERNAL DU RÉSEAU ROUTIER DU MTQ

Débit journalier moyen hivernal (DJMH)



Carte des accidents en période hivernale

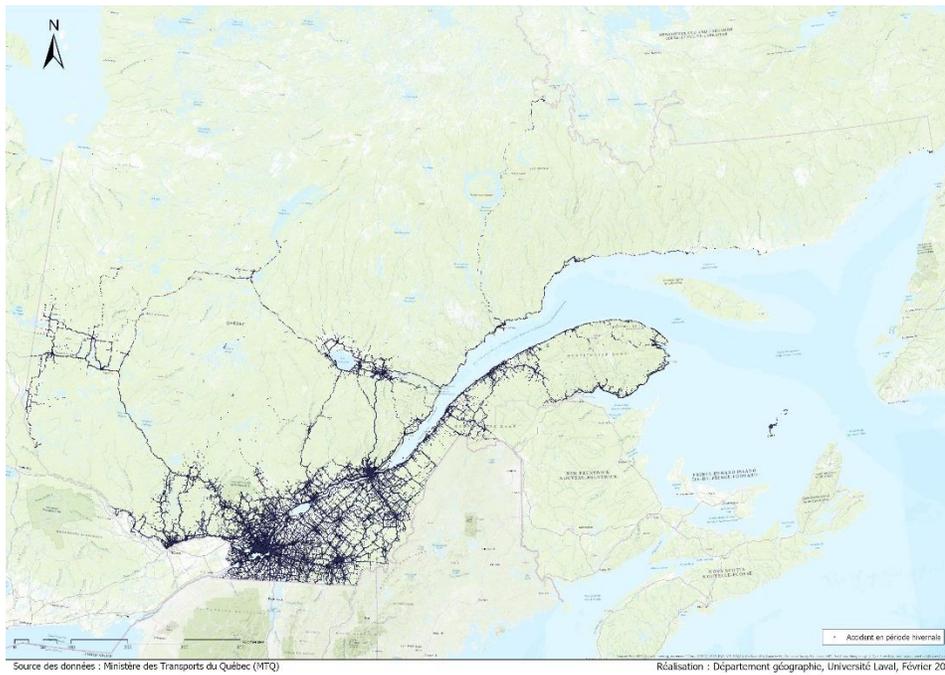
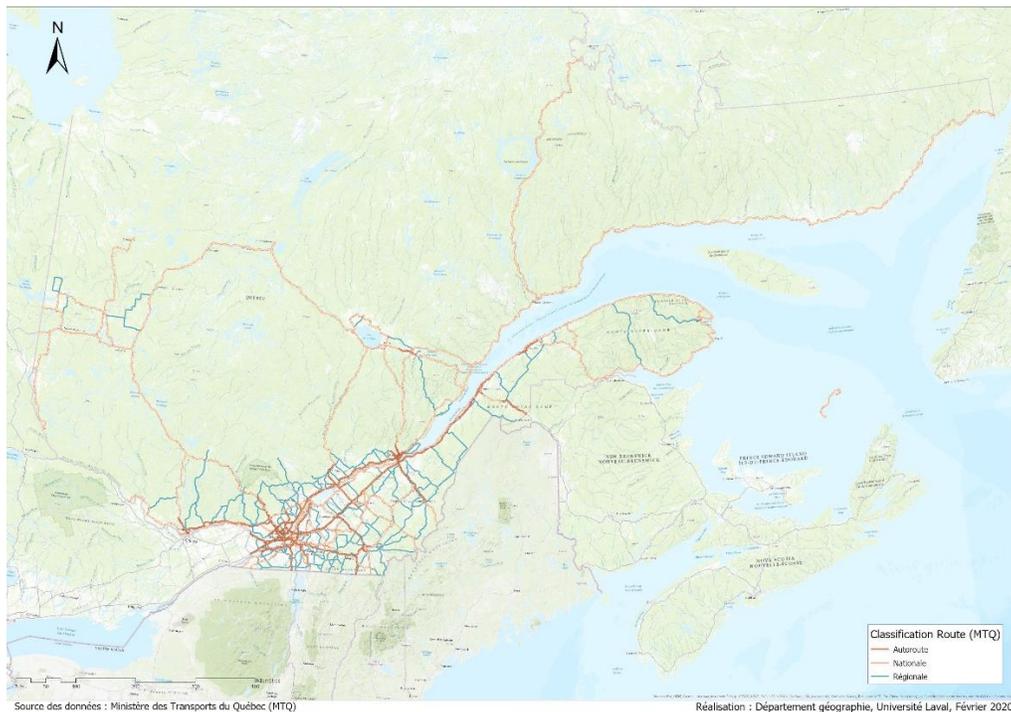


Figure 22 Données liées à la circulation

## OPTIMISATION DES ZCH ET DU RÉSEAU DE STATIONS DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRES POUR LES DÉCIDEURS OPÉRATIONNELS EN ENTRETIEN HIVERNAL DU RÉSEAU ROUTIER DU MTQ

La classe de route (CR) est un autre facteur important, ce critère a été pris en compte de manière indirecte en gardant pour l'analyse que les trois principales catégories de route du réseau routier du MTQ (Autoroute, nationale, régionale) (figure 23), autrement dit la priorité devrait être donnée aux catégories de route supérieures lors de l'installation d'une station météo-routière. Ceci peut être justifié par le fait que la totalité des SMR du réseau actuel est située le long de ces trois principales catégories de route, mais également par le souci d'offrir le plus d'avantages à un plus grand nombre d'utilisateurs de la route.



**Figure 23 Les trois principales catégories de route du Québec**

Les sources de l'ensemble des données utilisées sont décrites dans le tableau 7.

**Tableau 7 : Sources des données utilisées**

	Données	Unité	Référence spatiale	Résolution	Producteur	Format	Période couverte
Données météorologiques	Quantité de neige (Normales climatiques)	Mm	NAD83	10 x 10 km	MELCCQ	Shapefile	1981 à 2010
	Classification vent/tronçon de route	-	NAD83		MTQ	Shapefile	-
Données physiques	Hydrographie linéaire	-	NAD83		Données ouvertes Canada	Shapefile	-
	Hydrographie surfacique	-	NAD83		Données ouvertes Canada	Shapefile	-
Données sur le Trafic	Débit journalier moyen hivernal (DJMH)	-	NAD83		MTQ	Shapefile	-
	Accident	-	NAD83		MTQ	Shapefile	-

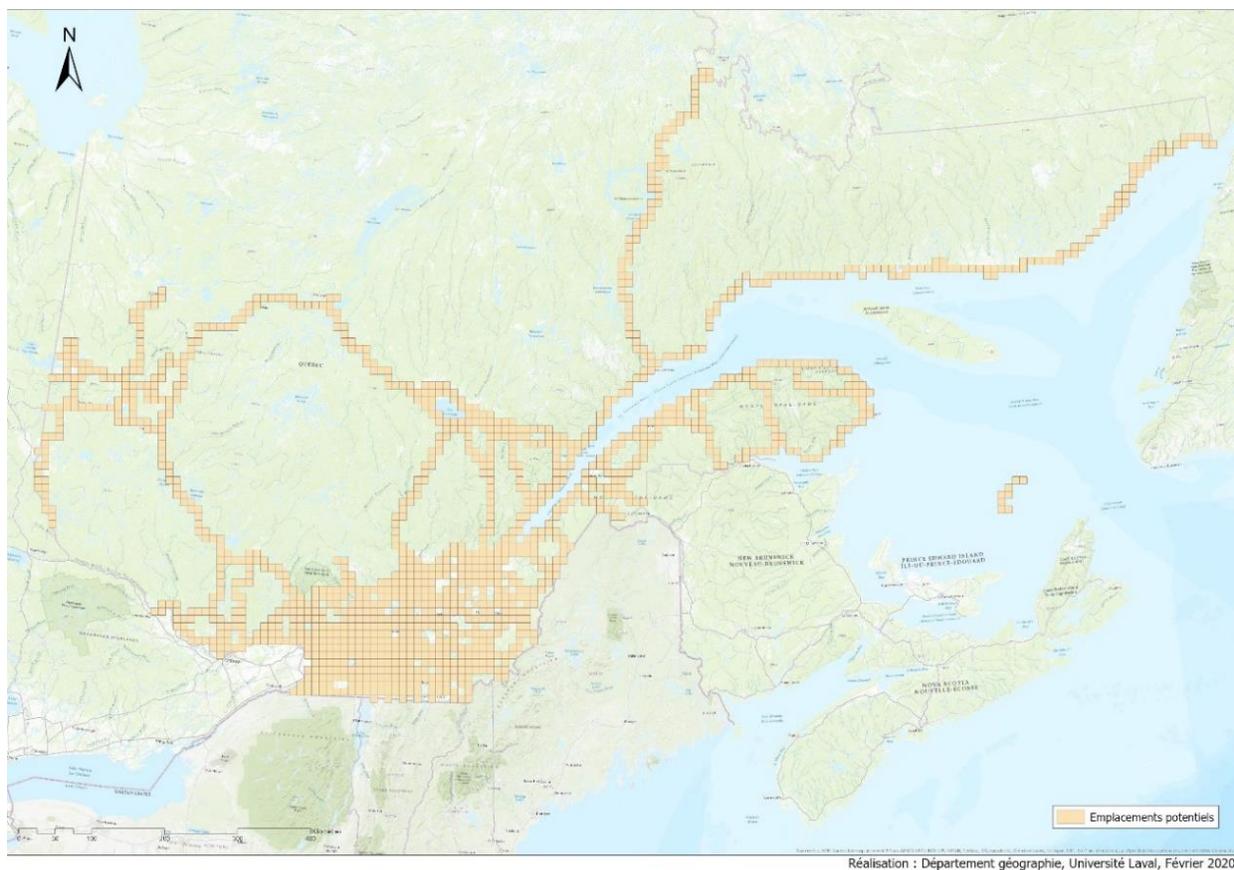
#### 4.1.2. Structuration du problème

Techniquement, la détermination de la position exacte des futures SMR semble peu réaliste vu la complexité du problème, d'autant plus que la définition d'une localisation ponctuelle exacte d'une station météo-routière peut ne pas convenir dans les applications du monde réel, car avant de décider de l'emplacement exact, plusieurs autres considérations locales doivent être prises en compte, tels que la sécurité et l'accès au réseau électrique. Pour répondre à cet objectif, il est possible de représenter le problème sous forme discret afin de réduire le degré de complexité et contribuer à augmenter l'efficacité du calcul. La méthode proposée consiste donc à appliquer une grille couvrant l'ensemble du réseau routier suivant une approche cellulaire afin d'obtenir un agencement optimal des SMR avec des méthodes d'identification des zones chaudes sensibles aux facteurs liés au climat et aux facteurs liés à la circulation.

À cette étape de la méthodologie, nous nous sommes confrontées à une question pertinente concernant la taille de la cellule à considérer. Répondre à cette question nécessite de déterminer la distance minimale pouvant séparer deux stations météo-routières. À notre connaissance, il n'existe pas de directives fournissant de telles informations, et à l'heure actuelle, le MTQ ne dispose d'aucune référence pour aider à déterminer la densité optimale pour les SMR. Leur décision est principalement dictée par le budget disponible, mais aussi dépend de la variabilité météorologique et des besoins de chaque région.

## OPTIMISATION DES ZCH ET DU RÉSEAU DE STATIONS DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRES POUR LES DÉCIDEURS OPÉRATIONNELS EN ENTRETIEN HIVERNAL DU RÉSEAU ROUTIER DU MTQ

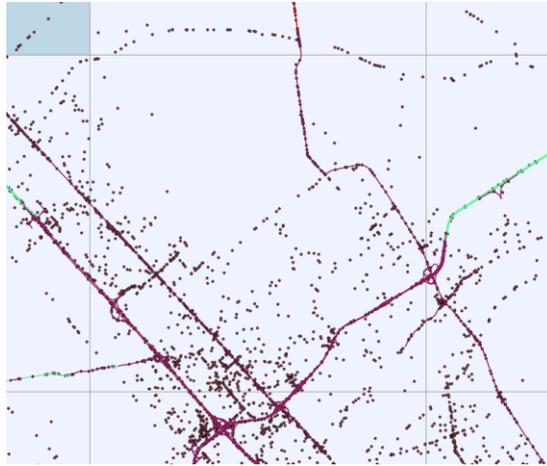
Dans le cas de notre étude, nous avons considéré un rayon de couverture fixe, autrement dit chaque cellule est identique en longueur et en largeur ainsi que l'emplacement de chaque cellule est censé être au centre de la cellule. Parmi tous les données collectées, seule la donnée sur la quantité de neige est de type polygonal, cette donnée est organisée sous forme de cellules de taille égale de 10 km x 10 km. Nous nous sommes donc basés sur celle-ci pour définir la résolution de notre grille d'analyse. Par la suite, nous avons superposé le réseau routier sur la grille et gardé pour l'analyse seules les cellules contenant les segments des trois principales classes de route du réseau routier du MTQ (Autoroute, nationale, régionale).



**Figure 24 Cellules potentielles pour l'installation des futurs SMR**

Comme le montre la figure 24, on compte 1356 emplacements potentiels dans la province. Avec ces emplacements potentiels, les données des paramètres de sélection retenus ont été mappées sur la grille où sont moyennées et attribuées aux cellules correspondantes.

Dans cette étape, nous avons utilisé cette grille du réseau routier retenue pour créer une base sur laquelle les données requises prétraitées ont été intégrées et fusionnées, de sorte que chaque cellule candidate de cette grille se voit attribuer les données des paramètres d'emplacement, qui provenaient de différentes sources et utilisaient des résolutions spatiales différentes.



**Figure 25** Figure montrant les différents formats des données

En raison des différents formats des données provenant de sources différentes comme le montre la figure 25, un travail important de géotraitement a été réalisé en amont dans le but d'obtenir des valeurs représentatives de chaque paramètre considéré en les intégrant dans un système d'information géographique.

Notez qu'une standardisation de type *Min-Max Rescaling Transformation* a été appliquée aux données. Cette standardisation nous a permis non seulement d'éliminer les biais potentiels liés aux unités de mesure, mais également de les ramener dans une même échelle. La standardisation nous a permis aussi d'attribuer des scores aux différents paramètres dans une plage 0 à 10 selon la formule suivante :

$$Score = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \times 10$$

OPTIMISATION DES ZCH ET DU RÉSEAU DE STATIONS DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRES POUR LES DÉCIDEURS OPÉRATIONNELS EN ENTRETIEN HIVERNAL DU RÉSEAU ROUTIER DU MTQ

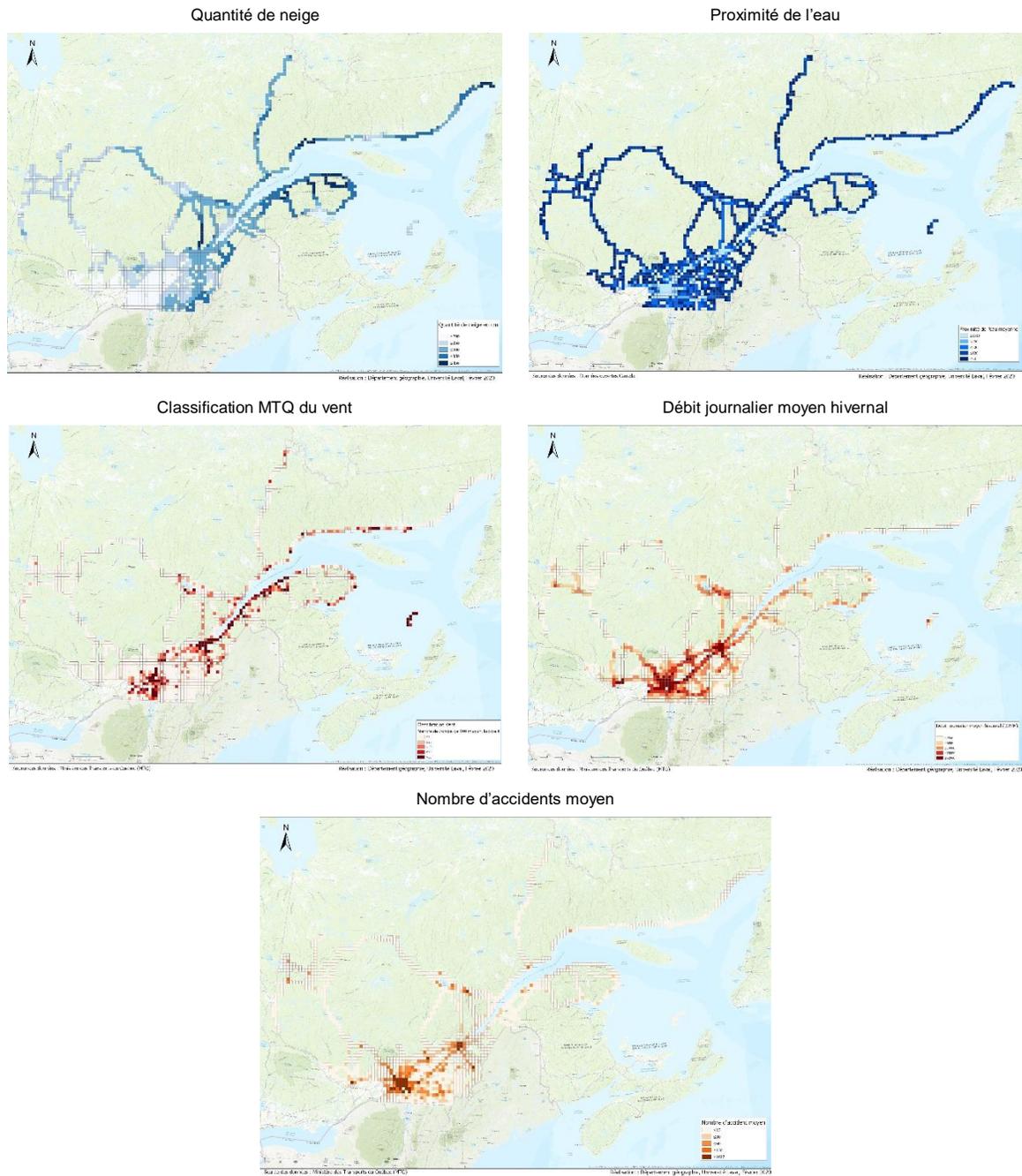
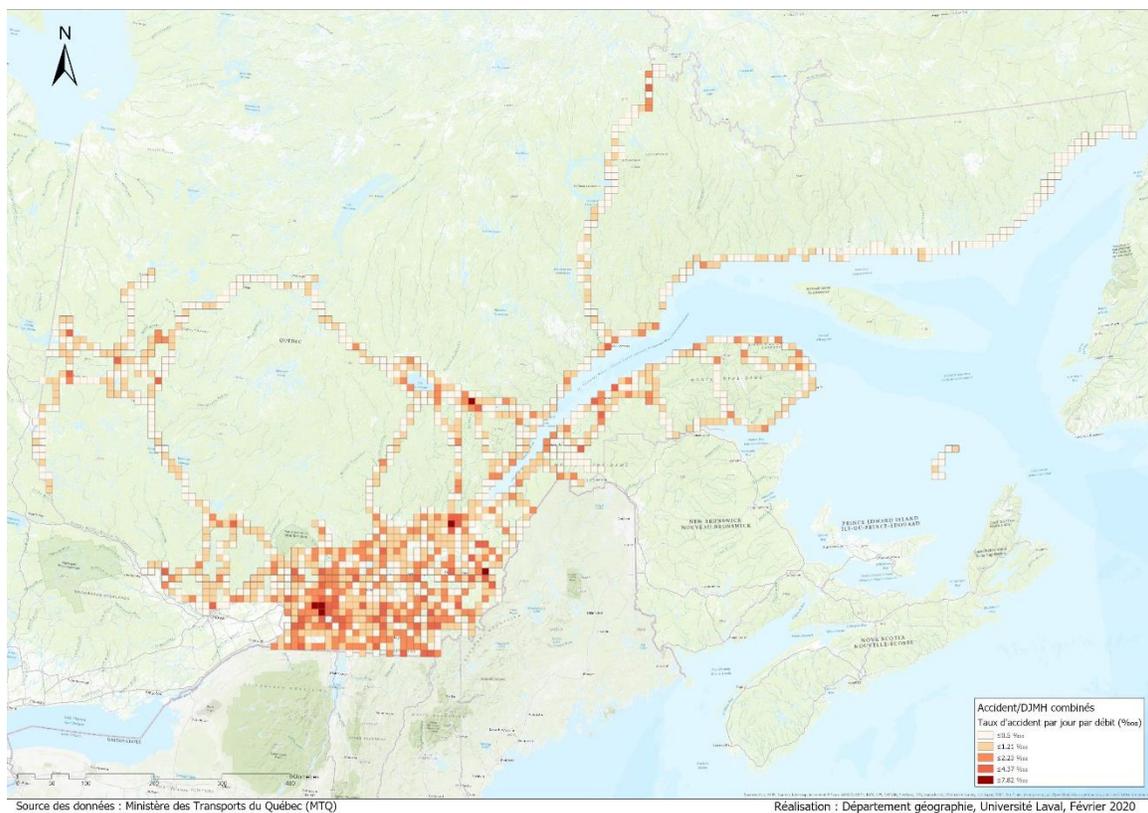


Figure 26 Les données des paramètres d'emplacement retenus mappées sur la grille des emplacements potentiels

## OPTIMISATION DES ZCH ET DU RÉSEAU DE STATIONS DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRES POUR LES DÉCIDEURS OPÉRATIONNELS EN ENTRETIEN HIVERNAL DU RÉSEAU ROUTIER DU MTQ

Comme on peut le voir dans la figure 26, le débit journalier moyen hivernal (DJMH) et le nombre d'accident moyen sont des facteurs de localisation qui présentent certains points communs. Les cellules ayant les fortes valeurs principalement situées autour des agglomérations représentent les tronçons de route ayant les plus grands volumes de circulation et le nombre d'accidents le plus élevé. Ce constat semble avoir du sens, surtout que le nombre d'accident est logiquement plus grand dans les tronçons de route accueillant un plus grand nombre de voyageurs. Par contre, les cellules de faible valeur caractérisent les segments de route moins prioritaires si on considère seuls les facteurs de circulation comme critères de localisation.

À travers les différentes discussions avec le MTQ, il a été jugé utile de combiner le nombre d'accidents et le débit journalier moyen hivernal en une seule mesure au lieu de les considérer séparément. Le taux d'accident par débit est illustré dans la figure 27.



**Figure 27** Taux d'accident par jour par débit

#### 4.1.3. Formulation de la fonction objectif

Il est difficile de choisir un emplacement plutôt qu'un autre, car un emplacement qui remplit les conditions d'un paramètre peut ne pas être optimal pour un autre paramètre. Par exemple, une zone de vents violents peut ne pas enregistrer une accumulation de neige importante. Afin de prendre en compte l'ensemble des facteurs de sélection d'emplacements, une fonction objectif a été proposée pour les combiner en une seule mesure. Cette fonction est formulée de manière à maximiser le score total pondéré de l'ensemble des facteurs de localisation en appliquant une contrainte budgétaire. Par conséquent, le problème d'optimisation est formulé comme suit :

$$\text{Maximiser } Sc = \sum_{k=1}^N (p_c Sc_k + p_T St_k) X_k$$

Où :

- $Sc$  est la fonction de score total définie comme la somme pondérée des scores de tous les cellules sélectionnées
- $N$  est l'ensemble des cellules potentielles,
- $Sc_k$  et  $St_k$  les scores de climat et de trafic, respectivement, à la cellule  $k$  et les poids associés sont représentés par,  $p_c$  et  $p_T$ .
- $X_k$  une variable binaire représentant la décision de localiser en  $k$ , où  $k \in N$ . Si la cellule  $k$  est sélectionnée,  $X_k$  est égal à 1 sinon 0, soit :

$$X_k = \begin{cases} 1 & \text{cellule } k \text{ est sélectionnée} \\ 0 & \text{Cellule } k \text{ n'est pas sélectionnée} \end{cases}$$

Les pondérations associées aux paramètres de localisation peuvent varier selon les régions. On ne sait pas combien de poids il faut accorder à chacun des critères décrits ici, mais il est clair que dans le cadre proposé, l'introduction de poids différents pour les paramètres utilisés doit être faite en fonction de leur importance. Ces poids peuvent être déterminés sur la base d'entretiens avec le personnel de maintenance régional. En raison des limites des données et du temps disponible pour cette étude, la pondération de tous les paramètres de localisation a été supposée égale.

Le budget total disponible limite le nombre de stations à localiser.

## 4.2. Résultats : Optimisation du réseau de SMR

### 4.2.1. Carte de score total

Dans cette section, nous exposons les résultats de notre analyse. Dans le contexte de la méthodologie proposée, les hypothèses suivantes ont été formulées : tous les accidents de la période hivernale ont été considérés sans faire distinction si les conditions météorologiques étaient bonnes ou non. On supposait qu'une SMR avait une portée de 10 km au-delà de laquelle l'efficacité devienne décroissante. Les poids de tous les paramètres de localisation sont supposés égaux.

Le problème d'optimisation défini par la fonction objectif selon la méthodologie proposée n'a pas été résolu suivant une approche d'optimisation du fait qu'aucune des contraintes formulées n'a été fournie par le MTQ. Cependant, le résultat de l'analyse peut être formulé de telle sorte que les 1356 cellules candidates sont triées en fonction de leurs valeurs combinant les paramètres de localisation dans un ordre décroissant (figure 28).

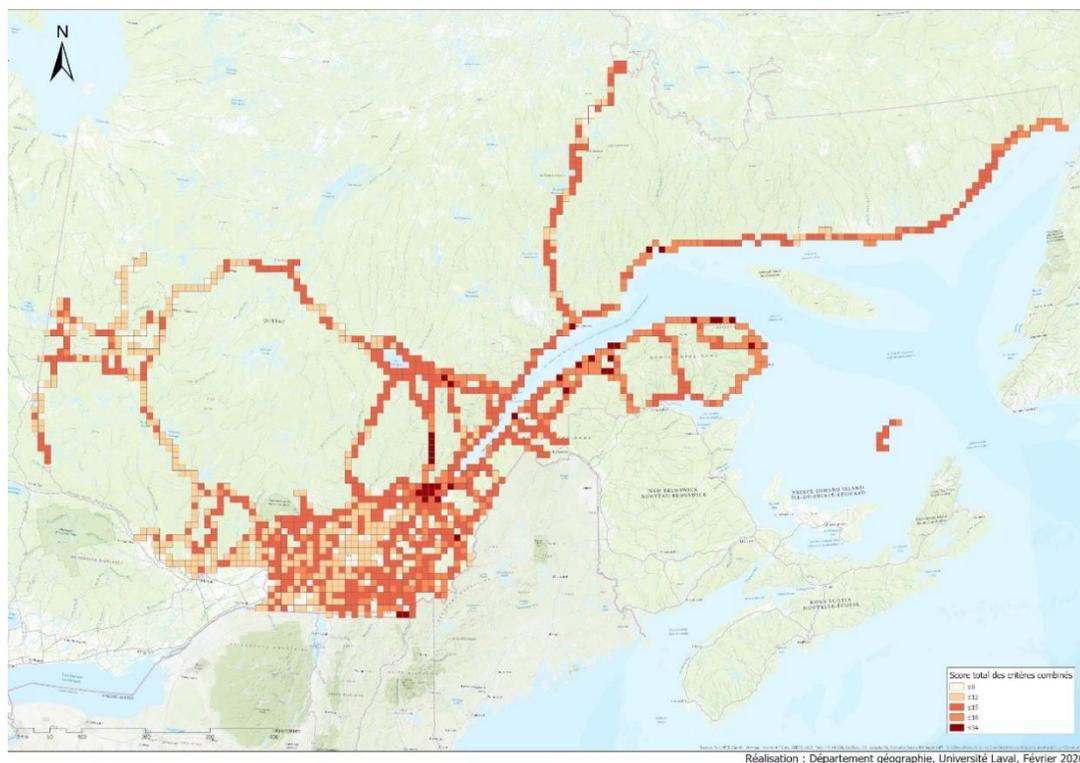
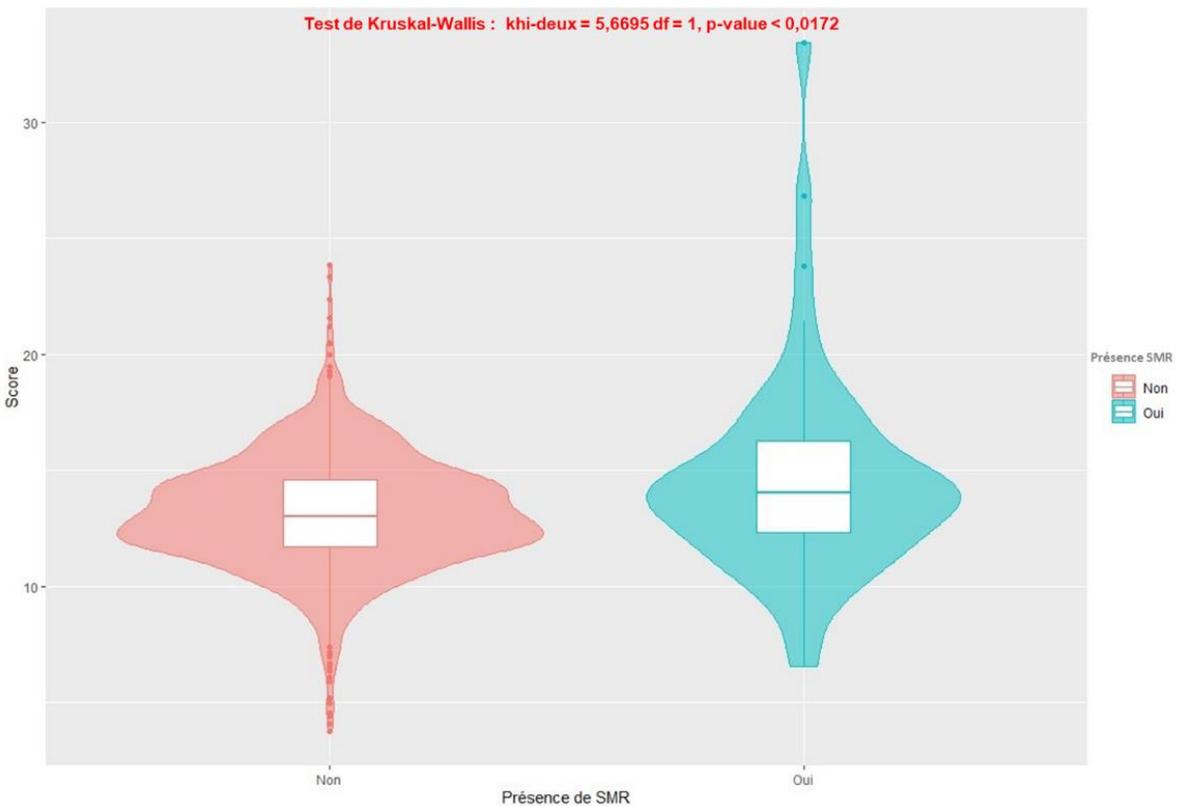


Figure 28 Carte de score total

De cette façon, les décideurs peuvent choisir le nombre de stations en fonction de leur budget et des besoins réels, et ceci en installant les nouvelles stations météo-routières dans les cellules prioritaires qui correspondent aux cellules ayant les plus grandes valeurs de scores tout en discrétisant celles contenant une SMR existante. Ceci dit que les segments de route contenus dans ces cellules connaissent donc des risques météorologiques élevés affectant la sécurité routière tels que l'accumulation de neige et le vent. Les problèmes causés par l'un de ces éléments s'intensifient lorsqu'ils se produisent sur des routes accueillant un plus grand nombre de voyageurs, ce qui produira à la fois des retards de circulation et une fréquence élevée d'accidents. Ceci pourrait être mieux géré avec la mise en place de nouvelles SMR. Les informations fournies par ces stations amorceraient des mesures d'entretien pour garder la route ouverte pendant de plus longues périodes et pourraient aider à réduire la gravité et le coût relativement élevé des accidents dans des conditions routières défavorables.

#### **4.2.2. Évaluation du réseau SMR actuel**

L'analyse primaire du résultat nous a permis dans un premier temps d'évaluer le réseau actuel des stations météo-routières de Québec. Le test de Kruskal-Wallis, qui est une alternative non paramétrique à l'ANOVA à un facteur (<http://www.sthda.com/english/wiki/kruskal-wallis-test-in-r>), est utilisé comme mesure d'évaluation pour comparer le score des cellules comportant les SMR actuels et celui des cellules ne contenant pas de SMR.



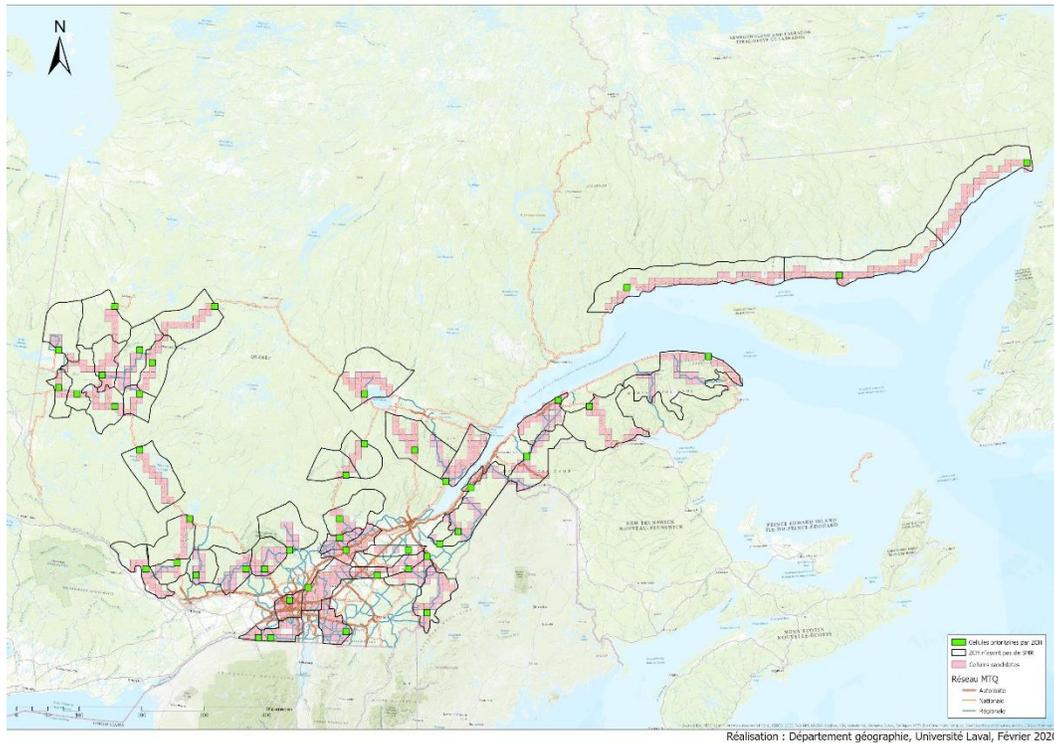
**Figure 29 Comparaison entre les groupes des cellules contenant une station météo routière et celui ne contenant pas de station**

Les résultats du test (figure 29) ont révélé que la médiane des scores des cellules comportant les SMR actuels est plus élevée que celle des scores des cellules ne contenant pas de SMR. Comme la valeur p est inférieure au niveau de signification de 0,05, nous pouvons conclure qu'au regard de l'indice Score et à un niveau de confiance de 95%, qu'il existe une différence statistiquement significative entre le groupe des cellules contenant une station météo routière et celui ne contenant pas de station météo routière. Le diagramme de boîte à moustache démontre que c'est la valeur des cellules contenant une station météo routière qui est significativement plus haute. Toutefois, il est intéressant de souligner que le test est basé sur l'évaluation par rapport aux emplacements actuels des stations de Québec, et ne fournit donc pas une mesure de la performance des pratiques utilisées auparavant. Toutefois, les résultats du test laissent dire que le réseau des SMR actuel fournit une couverture raisonnablement bonne à la fois sur le trafic et sur les facteurs météorologiques, mais peut-être pas de la manière la plus optimale.

### **4.2.3. Validation**

Dans le processus de validation, le MTQ, et à travers les différentes interactions avec l'équipe du travail, a exprimé son souhait que leurs stations SMR soient uniformément réparties dans la province afin d'éviter de regrouper les stations et de créer une dispersion uniforme dans l'espace, ce qui peut être obtenu en imposant une station météo-routière par zone climatique hivernale (les ZCH définies lors du premier objectif). Le MTQ a également suggéré que l'analyse soit réalisée sur un horizon de planification en trois phases qui correspondent à trois vagues d'investissement.

La solution consiste en un processus séquentiel. Dans un premier temps, nous avons gardé pour l'analyse que les cellules contenues dans les ZCH n'ayant pas de SMR. Pour chaque ZCH, choisir la cellule ayant la plus grande valeur de score par rapport aux autres cellules contenues dans la même zone, le nombre de cellules retenues sera donc égal au nombre de ZCH n'ayant pas de station météo-routière. Par la suite, les cellules retenues sont triées selon leurs valeurs par ordre décroissant sur lesquelles un plan d'investissement en trois phases pourra être appliqué en commençant par les cellules les plus prioritaires pour déterminer le nombre de stations à déployer par phase.



Réalisation : Département géographie, Université Laval, Février 2020

**Figure 30 Répartition des stations météo-routières dans l'espace en imposant une station météo-routière par ZCH**

Suite à cette analyse, sur un total de 88 zones climatiques hivernales, 46 ZCH sans station météo-routière ont été identifiées, ceci dit 46 stations météo-routières sont donc nécessaires pour obtenir une répartition uniforme dans l'espace en imposant une station météo-routière par zone climatique hivernale. Une inspection visuelle de la figure montre que les cellules identifiées sont bien réparties sur l'ensemble du réseau routier.

Si on considère le scénario d'une planification en trois phases, le déploiement des 46 stations sera échelonné sur trois étapes d'investissement soit 15 stations pour la première tranche d'investissement, 15 pour la deuxième et 16 stations pour la troisième. La répartition des stations par phase selon ce scénario est illustrée dans la figure 31.



### **4.3. Conclusion : Optimisation du réseau de SMR**

La station météo-routière est une composante essentielle pour la gestion des interventions météorologiques sur la route. La localisation d'une SMR exige la prise en compte de facteurs liés au climat et au trafic. Idéalement, un réseau de SMR optimal permettra aux décideurs de prendre des décisions basées sur des informations météorologiques précises et valides, conduisant ainsi à un niveau de service plus élevé, à des temps de congestion et des accidents réduits et à une utilisation plus efficace des moyens.

L'objectif de cette partie du projet était d'établir un plan détaillé pour l'extension du réseau de SMR à l'échelle de la province de Québec en tenant compte du réseau existant. Pour élaborer le plan de mise en œuvre des futurs SMR, diverses sources d'informations et de données ont été consultées, y compris l'état actuel du réseau SMR de Québec et les données nécessaires pour la sélection d'emplacements. Plusieurs paramètres de choix d'emplacements sont proposés sur la base de justifications scientifiques et rationnelles selon lesquelles un plan d'emplacement des futures SMR a été établi.

Une méthodologie d'optimisation a été proposée pour rechercher les emplacements optimaux des SMR et ceci dans le but de simplifier la prise de décision dans un contexte de planification. Cette méthodologie consiste en un processus à deux niveaux basé sur le SIG. Le premier niveau consiste à diviser la zone d'étude en cellules, à identifier les cellules vulnérables à la fois aux conditions météorologiques et aux conditions de circulation, puis à maximiser l'utilité totale. Dans ce premier niveau d'analyse, 1356 emplacements candidats ont été triés en fonction de leurs valeurs de score dans un ordre décroissant. Les résultats de cette étape ont été utilisés pour évaluer le réseau SMR actuel du Québec, et ceci en utilisant le test Kruskal-Wallis comme mesure d'évaluation de l'emplacement du réseau actuel. Le deuxième niveau incorporait les zones climatiques hivernales (ZCH) définies lors de la première partie du projet. Ces ZCH ont été utilisées pour affiner les solutions optimales à partir du niveau supérieur en imposant une station météo-routière par ZCH et en les examinant plus à fond en fonction de leurs valeurs de scores, ce qui permettra de garantir une bonne couverture spatiale du réseau des SMR.

L'emplacement proposé des futurs SMR dans le cadre de ce projet dépend principalement des hypothèses de base formulées au départ, mais également du nombre des paramètres

d'emplacement disponibles retenus pour l'analyse. Ceci dit que toute modification de l'une de ces hypothèses ou/et des paramètres d'emplacement peut entraîner des changements dans la configuration proposée. Néanmoins, ce projet a mis les bases d'une analyse plus poussée pouvant être réalisée pour trouver de meilleurs emplacements en apportant d'autres améliorations à la formulation du problème comme par exemple :

- Des améliorations concernant le manque d'information sur les pondérations qu'il faut accorder à chacun des paramètres utilisés pour avoir un réseau de SMR optimisé. Le cadre proposé est facile à appliquer lors de la planification d'une extension du réseau SMR en introduisant des poids différents pour les paramètres utilisés en fonction de leur importance. Le choix de ces poids peut être mieux effectué par une équipe d'experts routiers et météorologiques du ministère qui reflète leurs connaissances et leurs préférences pour planifier l'installation des futures SMR.
- Des améliorations concernant les critères de localisation en introduisant d'autres paramètres telle que la température de surface pour les critères climatiques, ou même intégrer d'autres facteurs d'ordre financier tels que les coûts d'entretien hivernal des routes et les couts de maintenance des SMR.

## 5. CONCLUSION GÉNÉRALE

---

Un des défis les plus importants du MTQ en période hivernale est d'assurer la viabilité hivernale de son réseau routier par le rétablissement des conditions de circulation afin de garantir la sécurité des usagers de la route en cas d'intempéries. Il doit donc organiser la surveillance du réseau et prévoir les actions permettant de limiter les accumulations de neige. Pour relever ce défi, le MTQ a mis en place un plan initial de contrôle basé sur la division de son réseau routier en zones homogènes connues sous le nom de zones climatiques hivernal (ZCH) et l'assignation à chaque zone une station météo-routière. Ce découpage a été réalisé en se basant principalement sur l'expérience et les observations du personnel opérationnel du MTQ en collaboration avec des météorologues d'Environnement Canada. Le MTQ compte actuellement 91 zones climatiques couvrant l'ensemble du réseau routier dont 53 se sont vu assigner une station météo-routière qui a été utilisée comme une source majeure de données météorologiques pour les applications de transport, principalement pour l'entretien hivernal. Ce projet a été entrepris afin de combler un vide scientifique, puisqu'aucune documentation précise sur la méthodologie utilisée par le MTQ pour la création des ZCH ou le positionnement des SMR n'est disponible aujourd'hui. Deux tâches principales du projet ont été achevées : 1) la révision du zonage existant en proposant un nouveau découpage en zones climatiques hivernales (ZCH) basées sur une approche scientifique et 2) permettre au MTQ de bénéficier d'un processus de sélection de sites moins subjectif pour déterminer l'emplacement optimal des futures SMR sur son réseau routier. L'examen de la littérature scientifique disponible a constitué une assise à l'atteinte de ces objectifs. Elle a permis d'identifier les paramètres et variables à prendre en compte pour la réalisation de chacun des objectifs, ainsi que de choisir les approches méthodologiques à préconiser. Bien qu'aucune étude similaire à notre problématique du premier objectif n'a été identifiée dans la littérature examinée pour ce rapport, certaines autres études utilisant des méthodes d'agrégation ont inspiré notre approche méthodologique. Pour le deuxième objectif, la littérature a révélé que l'implantation des SMR était au départ un processus subjectif reposant uniquement sur un jugement personnel. Par la suite, certaines autorités routières ont senti le besoin de commencer par définir des méthodes objectives de sélection des sites de SMR qui tentent de quantifier et d'optimiser les connaissances détenues par le personnel de leurs entités. Plusieurs études suggèrent des modèles d'optimisation utilisant des données liées à l'historique des accidents hivernaux, aux débits de circulation et aux données climatiques. Ce travail dans sa

première partie a permis, au moyen d'une classification automatique, d'obtenir un zonage en agrégats homogènes en 87 classes, à partir de trois catégories de données à savoir des données météorologiques, physiques et géographiques. Ce zonage permet de décrire des agrégats homogènes à l'intérieur desquels le comportement est similaire vis-à-vis des paramètres considérés. Le zonage final laisse apparaître des zones à faible variance intragroupe comparées à d'autres présentant une variabilité plus importante, tandis que le zonage initial en 12 classes permettait de retrouver les grandes caractéristiques régionales du réseau. Par la suite, un plan détaillé pour l'extension du réseau de SMR à l'échelle de la province de Québec a été établi en tenant compte du réseau existant. Diverses sources d'informations et de données ont été consultées, y compris l'état actuel du réseau SMR de Québec et les données nécessaires pour la sélection d'emplacements. Plusieurs paramètres de choix d'emplacements ont été proposés sur la base de justifications scientifiques et rationnelles selon lesquelles un plan d'emplacement des futures SMR a été établi. Une méthodologie a été proposée pour rechercher les emplacements optimaux des SMR. Celle-ci consiste en un processus à deux niveaux basé sur l'utilisation d'un SIG. Le premier niveau consiste à diviser la zone d'étude en cellules, à identifier les cellules vulnérables à la fois aux conditions météorologiques et aux conditions de circulation, puis à maximiser l'utilité totale. Dans ce premier niveau d'analyse, 1356 emplacements candidats ont été triés en fonction de leurs valeurs de score dans un ordre décroissant. Le deuxième niveau a consisté à intégrer dans l'analyse les zones climatiques hivernales (ZCH) définies lors de la première partie du projet. Cette étape d'analyse a permis d'affiner la solution optimale à partir du niveau supérieur en imposant une station météo-routière par ZCH et en examinant plus à fond en fonction de leurs valeurs de scores, ce qui permettra de garantir une bonne couverture spatiale du réseau des SMR.

Pour conclure, il faut être conscient du fait que :

- Bien qu'elles permettent la délimitation d'agrégats homogènes à l'intérieur desquels le comportement est similaire vis-à-vis des paramètres considérés, les méthodes d'agrégation qui capturent des variables multiples pour identifier des zones homogènes peuvent réduire la richesse des informations initiales fournies suite aux différentes interpolations et transformations des données sur lesquelles ces méthodes sont basées.

- Les deux objectifs étudiés dans ce projet supposent avoir initialement adopté certaines hypothèses priori, telles que le nombre de variables prises en compte, nombre de paramètres d'emplacement disponibles retenus pour l'analyse, la durée de la période hivernale considérée et plusieurs autres. La modification de l'une de ces hypothèses entraîne inévitablement des changements dans la configuration des résultats.

Néanmoins, d'autres recherches fondées sur les résultats de cette étude devraient inclure un certain nombre de recommandations pratiques découlant des objectifs du projet considérés :

- L'apport de l'expertise du personnel terrain du MTQ reste capital et ne doit pas être exclu à aucun moment du processus, que ce soit pour le zonage ou l'emplacement des futures stations météo-routières.
- La base de données dont dispose le MTQ et qui est alimentée principalement par le réseau des stations météo-routières déjà existantes, nécessite un grand effort de consolidation pour la rendre exploitable.
- Le MTQ pourrait introduire des pondérations sélectionnées par des experts routiers et météorologiques du ministère qui reflètent leurs connaissances et leurs préférences pour planifier l'installation des futures SMR.
- À mesure qu'ils deviennent disponibles, d'autres paramètres de localisation peuvent être utilisés pour affiner le choix optimal des sites tel que la température de surface pour les critères climatiques et d'autres facteurs d'ordre financier tels que les coûts d'entretien hivernal des routes et les coûts de maintenance des SMR.

## 6. RÉFÉRENCES

---

- Abdolhay, A., Saghafian, B., Mohd Soom, M.A. & Ghazali, A.H.B. (2012). « Identification of homogenous regions in Gorganrood basin (Iran) for the purpose of regionalization ». *Natural Hazards*, 61(3), 1427-1442.
- Abdi, Hervé, et Lynne J. Williams (2010) *Principal Component Analysis*. John Wiley and Sons, Inc. WIREs Comp Stat 2. Consulté à l'adresse : <http://staff.ustc.edu.cn/~zwp/teach/MVA/abdi-awPCA2010.pdf>
- Arsenault, S. (2007). « Development of a Winter Maintenance Decision Support System. In 2007 ». [Papier de conférence] Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada: Transportation-An Economic Enabler (Les Transports: Un Levier Economique) Transportation Association of Canada. Consulté à l'adresse : <https://pdfs.semanticscholar.org/b86b/4578defa936d7c4d1b65550723eb1c1ab5f1.pdf>
- Assunção, R.M., Neves, M.C., Câmara, G. & Da Costa Freitas, C. (2006). « Efficient regionalization techniques for socio-economic geographical units using minimum spanning trees ». *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7), 797-811.
- Azam, M., Park, H.K., Maeng, S.J. & Kim, H.S. (2018). « Regionalization of drought across South Korea using multivariate methods ». *Water*, 10(1), 24.
- Barrette, N., Lalonde, B., Vandersmissen M.-H., Roy F. et al. (2018) Élaboration d'un atlas interactif en ligne de la vulnérabilité de la population québécoise aux aléas climatiques à l'intention des acteurs locaux et régionaux. Rapport de recherche pour le compte du consortium Ouranos. Section Santé et environnement bâti.
- Chien, S., Meegoda, J., Luo, J., Corrigan, P., & Zhao, L. (2014). « Road Weather information System Statewide Implementation Plan » [Final Report]. New Jersey Institute of Technology, New Jersey. 126 p. Consulté à l'adresse : [https://www.dot.ny.gov/divisions/engineering/technical-services/trans-r-and-d-repository/C-11-54%20Final%20Report\\_4-2014.pdf](https://www.dot.ny.gov/divisions/engineering/technical-services/trans-r-and-d-repository/C-11-54%20Final%20Report_4-2014.pdf)
- Darby, L. S. (2005). « Cluster analysis of surface winds in Houston, Texas, and the impact of wind patterns on ozone ». *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 44, 1788-1806.
- De Sa Junior, A., de Carvalho, L.G., da Silva, F.F. & de Carvalho Alves, M. (2012). « Application of the Köppen classification for climatic zoning in the estate of Minas Gerais, Brazil ». *Theoretical and Applied Climatology*, 108(1-2), 1-7.
- Dinpashoh, Y., Fakheri-Fard, A., Moghaddam, M., Jahanbakhsh, S. & Mirnia, M. (2004). « Selection of variables for the purpose of regionalization of Iran's precipitation climate using multivariate methods » *Journal of Hydrology*, 297(1-4), 109-123.

- Drouin, R., BenMabrouk, S., Brassard, P.-G., Noël, S., Godbout, É., Dubé, P., Champagne, F. et Morin, N. (2019). « Communication personnelle ».
- Fetzer, J., Caceres, H., He, Q., & Batta, R. (2018). « A multi-objective optimization approach to the location of road weather information system in New York State ». *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, 22(6), 503-516.
- Fovell, R. G. & Fovell, M.-Y. C. (1993). « Climate zones of the conterminous United States defines using cluster analysis ». *Journal of Climate*, 6, 2103-2135.
- Goyal, M.K. & Sharma, A. (2016). « A fuzzy c-means approach regionalization for analysis of meteorological drought homogeneous regions in western India ». *Natural hazards*, 84(3), 1831-1847.
- Hahus, I., Migliaccio, k., Douglas-Mankin, K., Klarenberg, G. & Munoz-Carpena, R. (2018). « Using cluster analysis to compartmentalize a large managed wetland based on physical, biological and climatic geospatial attributes ». *Environmental Management*, 62, 571-583.
- Ihs, A. (2002). « Winter maintenance in Sweden » [Rapport]. Swedish National Road and Transport Research Institute, Linköping, Suède. 30 p. Consulté à l'adresse : <https://www.diva-portcoll.org/smash/get/diva2:673726/FULLTEXT01.pdf>.
- Ippoliti, C., Candeloro, L., Gilbert, M., Goffredo, M., Mancini, G., Curci, G., Falasca, S., Tora, S., Di Lorenzo, A., Quaglia, M. & Conte, A. (2019). « Defining ecological regions in Italy based on a multivariate clustering approach: A first step towards a targeted vector borne disease surveillance ». *PLOS ONE*, 14(7).
- Irwin, S., Srivastav, R.K., Simonovic, S.P. & Burn, D.H. (2017). « Delineation of precipitation regions using location and atmospheric variables in two Canadian climate regions: the role of attribute selection ». *Hydrological Sciences Journal*, 62(2), 191-204.
- Jin, P. J., Walker, A., Cebelak, M., & Walton, C. M. (2014). « Determining strategic locations for environmental sensor stations with weather-related crash data ». *Transportation Research Record*, 2440, 34-42.
- Jolliffe, I.T. & Philipp, A. (2010). « Some recent developments in cluster analysis ». *Physics and Chemistry of the Earth*, 35(9-12), 309-315.
- Jolliffe, I. T. (2002) *Principal component analysis and factor analysis*. Principal component analysis, 150-166.
- Kim, J., Kim, H.-G. & Park, H.-D. (2016). « Surface Wind Regionalization Based on Similarity of Time-series Wind Vectors ». *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 10(2), 80-89.
- Kwon, Tae J., & Fu, L. (2013). « Evaluation of alternative criteria for determining the optimal location of RWIS stations ». *Journal Of Modern Transportation*, 21(1), 17-27.

- Kwon, Tae J., & Fu, L. (2016). « RWIS Network Planning: Optimal Density and Location » [Final Report]. University of Waterloo, Ontario, Canada. 128 p. Consulté à l'adresse : [http://publications.iowa.gov/27266/1/Final%20Report\\_RWIS\\_network\\_planning\\_for\\_optimal\\_density\\_and\\_location\\_w\\_cvr.pdf](http://publications.iowa.gov/27266/1/Final%20Report_RWIS_network_planning_for_optimal_density_and_location_w_cvr.pdf).
- Kwon, Tae J., Fu, L., & Melles, S. J. (2017). « Location Optimization of Road Weather Information System (RWIS) Network Considering the Needs of Winter Road Maintenance and the Traveling Public ». *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(1), 57-71.
- Kwon, Tae J., Fu, L., Melles, S. J., & Perchanok, M. S. (2016). « Optimizing the location of road weather information systems (RWIS) stations - A sampling design optimization approach » [Acte de colloque]. Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering. London, Ontario, Canada. 11 p.
- Kwon, Tae J., Fu, L., Perchanok, M. S., & McClintock, H. (2013). « A systematic approach for locating Road Weather Information System (RWIS) stations in Canada » [Affiche scientifique (poster)]. Ontario, Canada. Consulté à l'adresse : <http://conf.tac-atc.ca/english/annualconference/tac2013/poster1/kwon.pdf>.
- Kwon, Tae Jung, Fu, L., & Jiang, C. (2014). « Road weather information system stations where and how many to install: A cost benefit analysis approach ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, 42(1), 57-66.
- Laurinavicius, A., Cygas, D., Ciuprinskas, K., & Jukneviute, L. (2007). « Data analysis and evaluation of road weather information system integrated in Lithuania ». *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2(1), 5-11.
- Lee, D. & Oh, K. (2017). « Classifying urban climate zones (UCZs) based on statistical analyses ». *Urban Climate*, 24, 503-516.
- MDOT (Michigan Department of Transportation) (2007). « Road Weather Information System – Concept Of Operations » [Rapport]. Michigan Department of Transportation, Escanaba, Michigan, États-Unis. Consulté à l'adresse : [https://www.michigan.gov/documents/mdot/RWIS\\_Concept\\_of\\_Operations\\_-\\_Superior\\_Region\\_427446\\_7.pdf](https://www.michigan.gov/documents/mdot/RWIS_Concept_of_Operations_-_Superior_Region_427446_7.pdf).
- Modarres, R. (2006). « Regional precipitation climates of Iran ». *Journal of Hydrology*, 45(1), 15-29.
- Pineda-Martinez, L.F. & Carbajal, N. (2017). « Climatic analysis linked to land vegetation cover of Mexico by applying multivariate statistical and clustering analysis ». *Atmosfera*, 30(3), 233-242.
- Pinet, M. (2009). « Alberta RWIS network expansion, winter risk assessment and priority list for advanced winter maintenance strategies » [Papier de conférence]. TAC/ATC 2009 - 2009 Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada : Transportation in a Climate of Change, Vancouver, Colombie-Britannique, Canada.

Consulté à l'adresse : <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2009/pdf/Pinet.pdf>.

- Pinet, M., & Lo, A. (2003). « Development of a road weather information system (RWIS) network for Alberta's national highway system » [Papier de conférence]. TAC/ATC 2003 - 2003 Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada : The Transportation Factor, St. John, Terre-Neuve-et-Labrador, Canada. Consulté à l'adresse : <http://conf.tac-atc.ca/english/resourcecentre/readingroom/conference/conf2003/pdfs/pinet.pdf>.
- Raziei, T. (2018). « A precipitation regionalization and regime for Iran based on multivariate analysis ». *Theoretical & Applied Climatology*, 131(3-4), 1429-1448.
- Raziei, T., Bordi, I. & Pereira, L.S. (2008). « A precipitation-based regionalization for Western Iran and regional drought variability ». *Hydrology and Earth System Sciences*, 12, 1309-1321.
- Richman, M. B., & Adrianto, I. (2010). « Classification and regionalization through kernel principal component analysis ». *Physics and Chemistry of the Earth*, 35(9-12), 316-328.
- Sarmadi, F. & Shokoohi, A. (2015). « Regionalizing precipitation in Iran using GPCC gridded data via multivariate analysis and L-moment methods ». *Theoretical and Applied Climatology*, 122(1-2), 121-128.
- Singh, A. K., Li, J., Murphy, M., & Walton, C. M. (2016). « Optimizing environmental sensor station locations for road weather management: Overview and a generalized modeling framework ». *Transportation Research Record*, 2551, 18-28.
- Walker, A. J. (2012). « Optimization of site locations for a Road Weather Information System in Austin, Texas based on inclement weather crashes » [Thèse de maîtrise]. University of Texas at Austin, Austin, Texas, États-Unis. Consulté à l'adresse : <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/19708>.
- Yunus, F., Shafie, A., Jaafar, J. & Mahmud, Z. (2001). « Homogeneous climate divisions for Peninsular Malaysia ». *Geodinamica Acta*, 24(2), 89-94.
- Zhang, Y., Moges, S. & Block, P. (2018). « Does objective cluster analysis serve as a useful precursor to seasonal precipitation prediction at local scale? Application to western Ethiopia ». *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 143-157.
- Zhao, L., Chien, S. I., Liu, X., & Liu, W. (2015). « Planning a road weather information system with GIS ». *Journal of Modern Transportation*, 23(3), 176-188.
- Zhao, L., Chien, S., Meegoda, J., Luo, Z., & Liu, X. (2016). « Cost-benefit analysis and microclimate-based optimization of a RWIS network ». *Journal of Infrastructure Systems*, 22(2).

**Site WEB :**

ARCGIS PRO. *Fonctionnement de l'agrégation multivariée spatialement contrainte* [En ligne].  
[<https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/tool-reference/spatial-statistics/how-multivariate-clustering-works.htm>] (Septembre 2019)

DAYMET. *Daily Surface weather climatological summarises* [En ligne]. [<https://daymet.ornl.gov/>].  
(Septembre 2019)

STHDA. *Statistical tools for high-throughput data analysis* [En ligne].  
[<http://www.sthda.com/english/wiki/kruskal-wallis-test-in-r>]. (Décembre 2019)

**ANNEXE A**  
***BASES DE DONNÉES ET ÉQUATIONS DE RECHERCHE POUR L'OBJECTIF 1***

---

Base de données	Équations de recherche
Web of Science	<p>ALL=(homogen* OR uniform* OR {spatial* constrain*} OR {spatial* contigu*} OR {interval squared euclidean distance} OR {cluster analysis})</p> <p><b>AND</b></p> <p>ALL=(precipitation OR winter OR climat* OR topograph* OR hydro-climatic OR hiver* OR physiographi* OR hydrolog* OR {geographic attribute} OR snow*)</p> <p><b>AND</b></p> <p>ALL=(cluster* OR zon* OR regionalization OR regionalisation OR regroupement OR aggregation)</p>
GEOBASE, GEOREF, Inspec, Compendex	<p>(GIS OR "Geographical Information System" OR map* OR carto* OR analysis OR model* OR geograph*)</p> <p><b>AND</b></p> <p>(RWIS OR "Road weather information system" OR LCZ OR "Local climate zone" OR hierarchical OR "non-hierarchical")</p> <p><b>AND</b></p> <p>(cluster* OR zon* OR region* OR group* OR uniform* OR aggregat* OR similar*)</p> <p><b>AND</b></p> <p>(climat* OR weather OR topograph* OR wind OR precipitation OR temperature OR winter OR snow*)</p>
Google Scholar	<p>Articles contenant <b>tous les mots suivants</b> :</p> <p>Cluster, zone, climate, weather, precipitation, LCZ, cluster</p> <p>Articles contenant <b>au moins un des mots suivants</b> :</p> <p>Group, region, zone, rwis, "road weather information system", "local climate zone"</p>

**ANNEXE B**  
***BASES DE DONNÉES ET ÉQUATIONS DE RECHERCHE POUR L'OBJECTIF 2***

---

OPTIMISATION DES ZCH ET DU RÉSEAU DE STATIONS DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRES POUR LES DÉCIDEURS OPÉRATIONNELS EN ENTRETIEN HIVERNAL DU RÉSEAU ROUTIER DU MTQ

Base de données	Équations de recherche
Web of Science	<p>ALL=(localis* OR locat* OR opitmiz* OR siting OR mak* OR creat* OR build* OR map* OR carto* OR model* OR plan* OR monitor* OR design*)</p> <p><b>AND</b></p> <p>ALL=(winter* OR hiver* OR snow*)</p> <p><b>AND</b></p> <p>ALL=(RWIS OR (road* AND weather AND information AND system) OR (road* AND weather AND management) OR (road* AND sensor*) OR (road* AND winter* AND maintenance) OR (road* AND maintenance) OR (road* AND network AND winter) OR (station AND météo* AND rout*))</p>
GEOBASE, GEOREF, Inspec, Compendex	<p>((((RWIS OR "Road Weather information system") WN All fields)</p> <p><b>AND</b> ((Winter OR Snow OR Ice) WN All fields))</p> <p><b>AND</b> ((position* OR arrange* OR Locat*) WN All fields)</p>
Google Scholar	<p>Articles contenant <b>tous les mots suivants</b> :</p> <p>Weather, snow, position*, rwis</p> <p>Articles contenant <b>au moins un des mots suivants</b> :</p> <p>LCZ, "Road weather information system"</p>

**ANNEXE C**  
**SYNTHÈSE DES INFORMATIONS RECUEILLIES DES RAPPORTS DE MONIQUE**  
**PLAMONDON**

---

OPTIMISATION DES ZCH ET DU RÉSEAU DE STATIONS DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRES POUR LES DÉCIDEURS OPÉRATIONNELS EN ENTRETIEN HIVERNAL DU RÉSEAU ROUTIER DU MTQ

Rapports de Monique Plamondon	Informations pertinentes retenues
<p><b>Rapport de 1994</b></p> <p>« Les systèmes météo routiers — État de la situation et opportunité pour le MTQ de s’initier à cette technologie par un projet pilote dans la région de Québec (Rives Nord et Sud) »</p>	<p>Rapport préalable à l’implantation d’un projet pilote d’un système météo routier au Québec.</p> <p>Ce qui se retrouve dans le rapport : impacts de l’utilisation des systèmes routiers, pertinence pour le MTQ d’une telle expérimentation, théorie sur les systèmes météo routiers dans le monde, détermination du site d’essai, ressources humaines et financières impliquées dans le projet, recommandations.</p> <p>Au départ, c’est la méthode de la cartographie thermique qui est alors retenue pour déterminer la localisation des stations.</p>
<p><b>Rapport de 1997</b></p> <p>« Projet pilote d’implantation de stations météo routières dans les directions de Québec et de Chaudière-Appalaches — <i>Cheminement du projet et bilan du premier hiver</i> »</p>	<p>La cartographie thermique (réalisée par une firme externe) a permis de choisir 4 localisations de stations. Toutefois, lors des visites sur le terrain des responsables des opérations hivernales, des arguments ont été apportés en défaveur de la localisation déterminée par la cartographie thermique.</p> <p>En 1995, Jean-Jacques Roussel, expert français en viabilité hivernale, a insisté « grandement sur la nécessité d’impliquer dès le départ le personnel qui aurait travaillé avec les données des stations météo routières. Ceci incluait de prendre en considération les commentaires du personnel sur les localisations des stations » (page 21).</p>
<p><b>Rapport de 1999</b></p> <p>« Projet pilote d’implantation de stations météo routières dans les directions de Québec et de Chaudière-Appalaches — <i>Déroulement du projet, bilan et perspectives d’avenir</i> »</p>	<p>Rapport sur le bilan final de ce projet pilote.</p> <p>Monique Plamondon explique que pour ce projet pilote, la méthode de positionnement des SMR qui a été choisie est celle du positionnement aux endroits où des situations problématiques pour les opérations hivernales ont été repérées. Cette méthode a été choisie, car elle rallie les gestionnaires de la maintenance hivernale qui ont une bonne connaissance de leur réseau.</p> <p>Commentaire : aujourd’hui, selon les bases de données du MTQ, seulement 2 des 4 stations du projet pilote sont encore fonctionnelles. La troisième est non opérationnelle et la quatrième n’existe plus.</p>

**ANNEXE D**

***TABLEAU SYNTHÈSE DES PARAMÈTRES ET MÉTHODOLOGIES DE POSITIONNEMENT DU RÉSEAU DE SMR  
UTILISÉES PAR DIFFÉRENTS GOUVERNEMENTS***

---

OPTIMISATION DES ZCH ET DU RÉSEAU DE STATIONS DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRES POUR LES DÉCIDEURS OPÉRATIONNELS EN  
ENTRETIEN HIVERNAL DU RÉSEAU ROUTIER DU MTQ

Pays/ Province/ État	Paramètres, variables ou facteurs pris en compte	Méthode de positionnement des SMR	Sources
ALBERTA	<p><i>PHASE 1 – 2003 (Positionnement des premières stations) :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Connaissance et expertise des opérateurs de maintenance hivernale</li> <li>• Tendances météorologiques</li> <li>• Données sur le trafic</li> <li>• Données sur la sécurité (accidents)</li> <li>• Données géographiques et environnementales (topographie, végétation, proximité à un plan d'eau, etc.)</li> </ul>	<p><i>PHASE 1 – 2003 (Positionnement des premières stations) :</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Entrevue avec des opérateurs de maintenance hivernale au moyen d'un questionnaire, dans le but d'identifier 2 sites potentiels pour le positionnement de stations tous les 50 kilomètres le long des autoroutes du réseau. Identification également de « points chauds » en termes de maintenance hivernale.</li> <li>2. Utilisation d'une approche innovatrice pour créer un modèle de sélection de sites à l'aide des SIG (Système d'Information Géographique). Le modèle a servi à identifier des segments de routes contiguës ayant des tendances homogènes au niveau de la maintenance hivernale. Le modèle incluait autant des paramètres environnementaux qu'opérationnels. Ce modèle a été utilisé pour créer des régions et valider les sites candidats repérés par les opérateurs de maintenance hivernale. Aucune information précise sur cette méthodologie.</li> </ol>	Pinet et Lo, 2003
	<p><i>PHASE 2 – 2009 (Optimisation du réseau) :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Localisation des stations existantes</li> <li>• Topographie</li> <li>• Hydrologie</li> <li>• Zones météorologiques</li> <li>• Fréquence et sévérité des accidents de la route en hiver, volume du trafic</li> <li>• Zones de lacune en termes de modélisation météorologique.</li> </ul>	<p><i>PHASE 2 – 2009 (Optimisation du réseau) :</i></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Analyse à grande échelle pour identifier les régions déficientes au niveau du réseau de stations météorologiques routières (RWIS Deficient Regions), utilisant des outils des SIG. Aucun détail sur les méthodes précises pour créer ce modèle.</li> <li>2. Rencontres et entrevues avec des représentants des opérations hivernales dans le but de vérifier et valider la localisation des régions déficientes, de recevoir les commentaires du personnel des opérations, ainsi que de déterminer les régions déficientes possiblement manquantes.</li> </ol>	Pinet, 2009

OPTIMISATION DES ZCH ET DU RÉSEAU DE STATIONS DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRES POUR LES DÉCIDEURS OPÉRATIONNELS EN  
ENTRETIEN HIVERNAL DU RÉSEAU ROUTIER DU MTQ

Pays/ Province/ État	Paramètres, variables ou facteurs pris en compte	Méthode de positionnement des SMR	Sources
ONTARIO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Paramètres géographiques (latitude, longitude, altitude, topographie)</li> <li>• Facteurs météorologiques (variabilité de la température de surface, moyenne de la température de surface, équivalent en eau de neige, précipitations neigeuses)</li> <li>• Facteurs liés au trafic et aux collisions (fréquence, volume, localisation, type, nombre annuel d'accidents, etc.)</li> <li>• Classification des autoroutes avec géocodage (système de référencement linéaire)</li> <li>• Connaissance et expertise des opérateurs de maintenance hivernale</li> </ul>	<p>L'optimisation du réseau de stations météorologiques routières du MTO est le résultat d'une combinaison de trois domaines : la méthodologie scientifique développée par l'organisation internationale Aurora (décrite ci-dessous), l'expertise du fournisseur de service actuel Wood, ainsi que l'expertise et les connaissances des opérateurs locaux de maintenance hivernale.</p> <p><i>Méthodologie développée par Aurora pour l'Ontario :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>→ Utilisation d'une approche fondée sur des mesures de substitution (« Surrogate measure-based approach »).</li> <li>→ Deux types de paramètres ont été considérés : facteurs météorologiques et facteurs liés au trafic et aux accidents.</li> <li>→ Trois alternatives ont été développées : une méthode de sélection de localisations de stations en n'utilisant que les facteurs météorologiques, une méthode de sélection de localisations en n'utilisant que les facteurs liés au trafic et aux accidents, ainsi qu'une méthode de sélection de localisations qui combinent les deux types de paramètres.</li> <li>→ La troisième alternative combinant les facteurs météorologiques et les facteurs liés au trafic et aux accidents propose un bel équilibre et une distribution de stations uniforme.</li> </ul> <p>Les localisations théoriques proposées par Aurora ont ensuite été fournies à Wood pour évaluation, en impliquant l'expertise locale des opérateurs.</p>	Kwon et Fu, 2016

OPTIMISATION DES ZCH ET DU RÉSEAU DE STATIONS DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRES POUR LES DÉCIDEURS OPÉRATIONNELS EN  
ENTRETIEN HIVERNAL DU RÉSEAU ROUTIER DU MTQ

Pays/ Province/ État	Paramètres, variables ou facteurs pris en compte	Méthode de positionnement des SMR	Sources
COLOMBIE- BRITANNIQUE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facteurs météorologiques</li> <li>• Facteurs géographiques (exposition des routes au soleil, exposition à des plans d'eau, etc.)</li> <li>• Caractéristiques des routes (type de route, ponts, pentes, etc.)</li> <li>• Statistiques sur les accidents en hiver et zones à risque</li> <li>• Connaissance et expertise du personnel de maintenance hivernale</li> </ul>	<p>→ Localisation de stations météorologiques routières dans des zones où les conditions météorologiques et géographiques locales se combinent pour créer des problématiques et des défis pour les opérations de maintenance hivernale des autoroutes.</p> <p>Aucune méthodologie scientifique détaillée n'est disponible.</p>	Simon Walker (Weather and Climate Specialist, Ministry of Transportation)
NEW YORK (État)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Connaissance et expertise du personnel de maintenance hivernale</li> <li>• Facteurs météorologiques (Moyenne de l'accumulation de neige annuelle, variabilité des températures de surface en hiver, durée moyenne annuelle des précipitations de pluie verglaçante)</li> <li>• Facteurs liés au trafic et aux accidents</li> </ul>	<p>Méthodologie d'optimisation de stations en 5 étapes :</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Identifier les sites potentiels à l'aide de questionnaires remis au personnel de maintenance hivernale.</li> <li>2. Déterminer les facteurs pris en compte et le poids donné à chacun (facteurs météorologiques et facteurs liés au trafic et accidents)</li> <li>3. Intégrer et analyser les données dans ArcGIS pour déterminer la variabilité spatiale météorologique.</li> <li>4. Estimation de la représentativité spatiale des sites potentiels.</li> <li>5. Optimisation des localisations à l'aide d'un modèle d'optimisation à deux niveaux pour maximiser la couverture spatiale et maximiser les profits.</li> </ol>	Chien <i>et al.</i> , 2014

OPTIMISATION DES ZCH ET DU RÉSEAU DE STATIONS DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRES POUR LES DÉCIDEURS OPÉRATIONNELS EN  
ENTRETIEN HIVERNAL DU RÉSEAU ROUTIER DU MTQ

Pays/ Province/ État	Paramètres, variables ou facteurs pris en compte	Méthode de positionnement des SMR	Sources
MICHIGAN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Connaissance et expertise des opérateurs locaux de maintenance hivernale et de toutes les parties prenantes impliquées dans la gestion de la maintenance</li> <li>• Importance régionale de la route (volume du trafic)</li> <li>• Risque d'accident dans des conditions difficiles hivernales</li> <li>• Zones déficientes en termes de stations et d'informations météorologiques</li> </ul>	<p>→ L'état positionne les nouvelles stations de manière à satisfaire des exigences locales (régler des problématiques liées au climat hivernal dans des localisations très spécifiques) et régionales (localisation représentative des conditions météorologiques routières d'un segment de route de 10 à 15 miles).</p> <p>Aucune méthodologie scientifique n'est disponible.</p>	MDOT, 2007
NEW HAMPSHI RE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facteurs environnementaux et météorologiques (ex. : homogénéité du climat)</li> <li>• Facteurs logistiques (artères majeures, proximité des établissements du Département du transport)</li> <li>• Facteurs liés à la maintenance hivernale (zones problématiques)</li> <li>• Connaissance et expertise des opérateurs locaux de maintenance hivernale</li> </ul>	<p>→ Les sites potentiels étaient principalement localisés le long du corridor de l'autoroute 93, puisque c'est une artère majeure qui parcourt l'État du Nord au Sud.</p> <p>→ Certains sites furent sélectionnés près d'établissements du Département du transport pour réduire les coûts d'installation et de maintenance.</p> <p>→ D'autres cas impliquaient la sélection de sites étant particulièrement problématiques en termes de conditions hivernales.</p> <p>→ Évaluation des sites potentiels retenus avec le personnel de maintenance hivernale (ingénieurs, techniciens, etc.) au niveau météorologique et technique (systèmes de communication).</p> <p>Aucune méthodologie détaillée n'est disponible.</p>	Walker, 2012

OPTIMISATION DES ZCH ET DU RÉSEAU DE STATIONS DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRES POUR LES DÉCIDEURS OPÉRATIONNELS EN  
ENTRETIEN HIVERNAL DU RÉSEAU ROUTIER DU MTQ

Pays/ Province/ État	Paramètres, variables ou facteurs pris en compte	Méthode de positionnement des SMR	Sources
WISCONSIN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Connaissance et expertise des opérateurs de maintenance hivernale au niveau local et régional</li> </ul>	<p>→ Au départ, les sites des stations météorologiques routières n'ont pas été choisis en fonction de facteurs météorologiques ou géographiques, mais tout simplement en suivant une approche d'espacement : un site tous les 30 miles.</p> <p>→ Les stations plus récentes sont installées là où les opérateurs de maintenance hivernale le jugent nécessaire : comtés n'ayant pas encore de station, problématiques de maintenance liées à des facteurs météorologiques locaux, etc.</p> <p>Aucune méthodologie scientifique détaillée n'est disponible.</p>	Mike Adams (RWIS Program Manager, Wisconsin Department of Transportation)
DAKOTA DU NORD	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distance des stations existantes</li> <li>• Niveau d'importance des routes</li> <li>• Connaissance et expertise des opérateurs de maintenance hivernale</li> <li>• Zones déficientes en termes de couverture météo-routière</li> </ul>	<p>→ Les premières stations ont été positionnées aux intersections de routes majeures</p> <p>→ Une cartographie des stations existantes a été réalisée, avec la création d'une zone tampon de 30 miles autour du site pour évaluer la couverture régionale de chaque site.</p> <p>→ Élaboration de localisation de stations potentielles pour couvrir les aires qui ne sont pas suffisamment représentées et qui présentent des zones de vides en termes de couverture météo-routière.</p> <p>Aucune méthodologie scientifique détaillée n'est disponible.</p>	Walker, 2012
SUÈDE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Glissance</li> <li>• Fluctuation de températures</li> </ul>	<p>→ Cartographie thermique pour choisir l'emplacement des stations.</p> <p>→ Les stations sont placées plus densément dans les parties de la Suède où la température fluctue autour de 0 degré Celsius (i.e. dans le sud).</p> <p>→ Dans la partie nord du pays, les températures sont plus basses et plus stables, moins de stations y sont installées.</p> <p>→ Quelques stations sont placées de manière à ce que les congères de neige et les précipitations soient le mieux documentées.</p> <p>Aucune méthodologie scientifique détaillée n'est disponible.</p>	Ihs, 2002

***ANNEXE E***  
***CARTE DES ZONES CLIMATIQUE HIVERNALES APRÈS CORRECTION ET LISSAGE***

---

OPTIMISATION DES ZCH ET DU RÉSEAU DE STATIONS DE MÉTÉOROLOGIE ROUTIÈRES POUR LES DÉCIDEURS OPÉRATIONNELS EN ENTRETIEN HIVERNAL DU RÉSEAU ROUTIER DU MTQ

