

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE

PAR
CYRIL GUESDON

ÉTUDES DES RÉPARTITIONS DES ÉVÉNEMENTS
DE VERGLAS ET DE GIVRE À TRAVERS LE QUÉBEC

AUTOMNE 2000



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RÉSUMÉ

Les événements de givrage atmosphérique de janvier 1998, au sud du Québec et à l'est de l'Ontario, ont clairement démontré la vulnérabilité des structures aériennes face à ce phénomène atmosphérique ainsi que la nécessité d'améliorer nos connaissances actuelles dans ce domaine. Dans cette perspective, il est important de comprendre ce phénomène par l'analyse des événements de givrage atmosphérique antérieurs et, si possible, de les modéliser puis de les prédire. Cela permettra aux compagnies d'électricité de mieux dimensionner les équipements des réseaux aériens et d'établir des normes d'alerte.

La présente recherche, effectuée dans le cadre de la Chaire Industrielle CIGELE, a pour but d'analyser les événements passés enregistrés par le réseau de mesure SYGIVRE d'Hydro-Québec et d'effectuer une analyse spatiale de la distribution des tempêtes de givrage atmosphérique (au sens large du terme, c'est-à-dire pour toute intensité de précipitation) dans les différentes régions du Québec. Pour ce faire, nous disposons de la base de données de givrage SYGIVRE qui couvre une période d'observations de 8 ans sur un total de 23 stations et qui est basée les mesures d'un appareil développé par Hydro-Québec, appelé givromètre (ice rate meter). Nous utiliserons aussi une autre source de données sur le givrage fournie par Hydro-Québec (PIM) qui couvre une période d'observations de 21 ans sur un total de 180 stations déployées dans toute la province et qui repose sur des mesures délivrées par des glaciètres (passive ice meter).

L'analyse exploratoire des événements de verglas et de givre contenus dans la base de données SYGIVRE constitue la première étape de l'étude. Cette étude exploratoire permet de faire ressortir les caractéristiques propres à chaque paramètre du réseau SYGIVRE. La base de données sur les PIM a servi de support de validation aux études effectuées sur la base de données SYGIVRE puisque la période d'observations de la première est beaucoup plus grande mais que la précision est moindre. Pour ne pas créer de biais dans la comparaison entre les deux bases de données, seules les stations du réseau de PIM géographiquement proches de celles du réseau SYGIVRE, ont été retenues. Cela permet d'avoir deux réseaux de stations sensiblement identiques pour ce qui est de la couverture géographique du territoire étudié.

La notion d'intensité pour un processus de Poisson non homogène a été introduite dans l'étude afin d'évaluer la probabilité qu'un événement devant apparaître, se produise dans une période donnée. Cette caractéristique est propre aux stations et aux années c'est-à-dire qu'elle est fonction de la situation

géographique des stations et de la rigueur de l'hiver pour une année donnée. Cette notion d'intensité est utilisée pour obtenir des groupements d'années qui sont identiques. Le petit nombre d'années d'observations nous a empêché d'utiliser les résultats sur les groupements d'années pour la suite de l'étude mais il est tout de même intéressant de noter que les années communes entre les deux bases de données sont identiques au point de vue événements.

L'analyse spatiale de la distribution des tempêtes de givrage atmosphérique se fait généralement en considérant directement la distance géographique sans considérer la présence de microclimats ou la topographie entre les stations. Ces paramètres peuvent changer considérablement les conditions météorologiques et donc la progression des tempêtes à travers une région donnée. L'approche utilisée dans ce travail est basée sur la proximité des stations en terme de partage des mêmes événements de givrage. Nous avons utilisé la probabilité de partage des événements entre les stations pour établir des groupements géographiques de stations. Finalement, nous avons modélisé les groupements obtenus par des variables exogènes différentes qui sont la température, la durée, le type de l'accumulation et le poids.

Cette méthode permet de définir des groupements de stations cohérents. Trois groupes de stations ressortent de cette étude. Ceux-ci comportent des stations présentant les mêmes caractéristiques au niveau du type de l'accumulation dominant et de la région où elles se trouvent. Pour expliquer ces groupes, la durée de l'événement est le paramètre essentiel. Parfois, la température joue un rôle lorsque nous ne tenons pas compte du type de l'accumulation. La prédiction effectuée à partir des régressions donne de bons résultats quand il s'agit de prévoir des événements locaux. Par contre, la prédiction du partage des événements entre plusieurs stations est nettement moins bonne.

Finalement, une étude sur une plus longue période d'observations augmentera les bases de données et améliorera les résultats.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été effectuée dans le cadre du programme de la Chaire industrielle CRSNG/Hydro-Québec/UQAC sur le givrage atmosphérique des équipements des réseaux électriques (CIGELE), à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC). Je tiens à remercier la Chaire industrielle CIGELE pour le support financier qu'elle m'a accordé durant la totalité de mes études. Je tiens à remercier avant tout mon directeur et mon codirecteur de recherche, les professeurs Louis Houde et Masoud Farzaneh, pour leurs conseils judicieux et leur constant soutien et encouragement.

Je remercie tout le personnel du laboratoire et de l'UQAC qui, grâce à son soutien, a contribué à ce que mon séjour et mon travail se passent dans de très bonnes conditions.

Je remercie ma famille et mes amis pour les encouragements qu'ils m'ont apportés tout au long de cette recherche.

Enfin, si j'ai pu aller au Canada et faire mes études à l'UQAC, c'est grâce à une collaboration entre les professeurs, Jacques Bouillot et Yves Teisseires, de l'École Supérieure d'Ingénieurs d'Annecy en France, et le professeur Masoud Farzaneh, titulaire de la CIGELE. Je tiens à les remercier vivement de m'avoir donné une telle occasion.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	ii
REMERCIEMENTS	iv
TABLE DES MATIÈRES.....	vi
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES TABLEAUX.....	xv
 Introduction	 1
1.1 Problématique	2
1.2 Objectifs	8
1.3 Méthodologie.....	9
 Description des données disponibles.....	 11
2.1 Réseau SYGIVRE.....	12
2.1.1 Base de données	13
2.1.2 Les stations de mesure.....	14
2.1.2.1 Répartition géographique.....	15
2.1.2.2 Répartition temporelle.....	16
2.1.2.3 Caractérisation des paramètres disponibles	17
2.1.2.3.1 Relevés météorologiques.....	18

2.1.2.3.2	Relevés climatologiques.....	18
2.1.2.3.3	Description du givromètre	19
2.1.2.3.4	Avantages et inconvénients	21
2.2	Réseau de PIM	23
2.2.1	Enregistrement des données lors d'un événement de givrage atmosphérique	24
2.2.2	Format de la base de données	26
2.2.3	Les stations de mesure.....	26
2.2.3.1	Répartition géographique.....	28
2.2.3.2	Répartition temporelle.....	28
2.2.3.3	Caractérisation des stations.....	31
2.2.3.4	Caractérisation des paramètres de la base de données.....	33
2.2.3.4.1	Relevés météorologiques.....	33
2.2.3.4.2	Relevés glaciométriques	34
2.2.3.4.2.1	Mesures.....	34
2.2.3.4.2.2	Avantages et inconvénients du glaciomètre	37
2.2.3.5	Caractéristiques des stations utilisées	40
2.2.4	Données utilisées.....	41
2.2.4.1	Paramètre	41
2.2.4.2	Mesures	42
2.3	Caractérisation des événements de givrage atmosphérique.....	43

Analyse exploratoire	45
3.1 Description des variables	47
3.1.1 Poids de l'accumulation	47
3.1.1.1 Base de données SYGIVRE	47
3.1.1.2 Évaluation de l'épaisseur des accumulations des événements pour la base de données sur les PIM	53
3.1.2 Températures d'acquisitions.	59
3.2 Caractérisation des stations	64
3.2.1 Fréquences des événements.....	65
3.2.2 Durée des événements	73
3.3 Saisons de givrage atmosphérique	78
3.3.1 Répartition des événements	79
3.3.2 Classification.....	88
3.3.2.1 Saisons	88
3.3.2.2 Distances	91
3.3.2.2.1 Distance basée sur la fonction d'intensité	92
3.3.2.2.2 Distance basée sur la fréquence.....	93
3.3.2.3 Regroupements des saisons	94
3.3.2.3.1 Base de données SYGIVRE	95
3.3.2.3.2 Base de données sur les PIM	97
3.3.2.4 Interprétation des classifications	99
3.3.2.5 Interprétation des résultats	99

3.4	Conclusions.....	101
	Analyse spatiale.....	104
4.1	Événements conjoints	105
4.2	Distances entre stations	110
4.3	Regroupements par station.....	112
4.3.1	Positionnements géographiques des regroupements	116
4.3.1.1	Base de données SYGIVRE	117
4.3.1.2	Base de données sur les PIM	119
4.3.2	Discussion	121
4.4	Modélisation des regroupements	122
4.4.1	Régression logistique.....	122
4.4.2	Résultats.....	125
4.4.3	Discussion	154
4.5	Conclusions.....	156
	Conclusions et Recommandations.....	158
	Conclusions générales.....	159
	Recommandations	164
	Références.....	166

LISTE DES FIGURES

Figure 2-1 : Emplacements des stations du réseau SYGIVRE.....	16
Figure 2-2 : Appareil de mesure : le givromètre	20
Figure 2-3 : Position du givromètre.....	22
Figure 2-4 : États des stations dans le réseau de PIM [3]	27
Figure 2-5 : Stations actives de juillet 1974 à juin 1980 (réseau de PIM).....	29
Figure 2-6 : Stations actives de juillet 1980 à juin 1985 (réseau de PIM).....	30
Figure 2-7 : Stations actives de juillet 1985 à juin 1990 (réseau de PIM).....	30
Figure 2-8 : Stations actives de juillet 1990 à juin 1996 (réseau de PIM).....	31
Figure 2-9 : Emplacements des stations du réseau de PIM	32
Figure 2-10 : Collecteur standardisé : le glacimètre 1/2	35
Figure 2-11 : Collecteur standardisé : le glacimètre 2/2	36
Figure 2-12 : Cycle d'une accumulation sur un cylindre lisse fixe.....	38
Figure 2-13 : Cycle d'une accumulation sur un câble ou un conducteur	39
Figure 2-14 : Positionnement des stations retenues du réseau de PIM	40
Figure 3-1 : Répartition du poids des accumulations de verglas pour le réseau SYGIVRE	48
Figure 3-2 : Répartition du poids des accumulations de givre pour le réseau SYGIVRE	49
Figures 3-3 et 3-4 : Une ou plusieurs accumulations.....	54

Figure 3-5 : Histogramme de la température des événements de verglas du réseau SYGIVRE	60
Figure 3-6 : Histogramme de la température des événements de givre du réseau SYGIVRE	61
Figure 3-7 : Répartition des événements de verglas du réseau SYGIVRE	65
Figure 3-8 : Répartition des événements de givre du réseau SYGIVRE	66
Figure 3-9 : Box-Plot sur le nombre d'événements moyen par année de verglas et de givre du réseau SYGIVRE.....	67
Figure 3-10 : Répartition du nombre d'événements pour le réseau de PIM	70
Figure 3-11 : Box-Plot sur le nombre d'événements moyen par station pour le réseau de PIM.....	71
Figure 3-12 : Répartition de la durée des événements de verglas du réseau SYGIVRE	74
Figure 3-13 : Répartition de la durée des événements de givre du réseau SYGIVRE	74
Figure 3-14 : Histogramme des durées des événements pour le réseau SYGIVRE	76
Figure 3-15 : Carte des durées des événements pour les stations du réseau de PIM.....	77
Figure 3-16 : Densité des événements de verglas au cours de la saison de givrage pour le réseau SYGIVRE.....	81

Figure 3-17 : Densité des événements de givre au cours de la saison de givrage pour le réseau SYGIVRE.....	82
Figure 3-18 : Répartition des événements par station pour la base SYGIVRE	84
Figure 3-19 : Densité des événements au cours de la saison pour le réseau de PIM.....	85
Figure 3-20 : Répartition des événements par station pour la base de données sur les PIM	87
Figure 3-21 : Densités des événements par saison pour le réseau SYGIVRE.....	89
Figure 3-22 : Densités des événements par saison pour le réseau de PIM	90
Figure 3-23 : Représentation de deux densités.....	93
Figure 3-24 : Regroupement des années à partir des intensités pour le réseau SYGIVRE	96
Figure 3-25 : Regroupement des années à partir de la proportion d'événements pour le réseau SYGIVRE	96
Figure 3-26 : Regroupement des années à partir des intensités pour le réseau de PIM.....	98
Figure 3-27 : Regroupement des années à partir de la proportion d'événements pour le réseau de PIM.....	98
Figure 4-1 : Événements conjoints de la base de données SYGIVRE	107
Figure 4-2 : Événements conjoints de la base de données sur les PIM	109
Figure 4-3 : Classification hiérarchique pour les événements de verglas.....	113
Figure 4-4 : Classification hiérarchique pour les événements de givre.....	113

Figure 4-5 : Classification hiérarchique pour tous les événements.....	114
Figure 4-6 : Classification hiérarchique pour tous les événements du réseau sur les PIM	116
Figure 4-7 : Représentation géographique des groupements pour les événements de verglas	117
Figure 4-8 : Représentation géographique des groupements pour les événements de givre	118
Figure 4-9 : Représentation géographique des groupements pour tous les événements.....	118
Figure 4-10 : Représentation géographique des groupements pour les événements du réseau de PIM.....	120
Figure 4-11 : Connexions entre deux stations adjacentes du groupe 1 du réseau SYGIVRE	129
Figure 4-12 : Connexions entre deux stations adjacentes du groupe 2 du réseau SYGIVRE	135
Figure 4-13 : Connexions entre deux stations adjacentes du groupe 3 du réseau SYGIVRE	141
Figure 4-14 : Connexions entre deux stations adjacentes du groupe 1 du réseau de PIM.....	145
Figure 4-15 : Connexions entre deux stations adjacentes du groupe 2 du réseau de PIM.....	149

Figure 4-16 : Connexions entre deux stations adjacentes du groupe 3 du réseau de PIM.....	153
--	-----

LISTE DES TABLEAUX

Table 3-1 : Statistiques pour le poids des accumulations de verglas pour les stations du réseau SYGIVRE	50
Table 3-2 : Statistiques pour le poids des accumulations de givre pour les stations du réseau SYGIVRE	51
Table 3-3 : Statistiques pour le poids des accumulations de verglas par saison pour le réseau SYGIVRE	52
Table 3-4 : Statistiques pour le poids des accumulations de givre par saison pour le réseau SYGIVRE	52
Table 3-5 : Statistiques pour les épaisseurs totales par station des accumulations pour le réseau de PIM	57
Table 3-6 : Statistiques pour l'épaisseur des accumulations par saison pour le réseau de PIM	58
Table 3-7 : Statistiques pour les températures des événements de verglas	62
Table 3-8 : statistiques pour les températures des événements de givre	63
Table 3-9 : Principales statistiques pour le nombre d'événements de verglas par station pour le réseau SYGIVRE	68
Table 3-10 : Principales statistiques pour le nombre d'événements de givre par station du réseau SYGIVRE	69

Table 3-11 : Principales statistiques pour le nombre d'événements par station et par année pour le réseau de PIM	72
Table 4-1 : Coefficients de la régression des stations du groupe 1 pour les événements de type verglas du réseau SYGIVRE.....	125
Table 4-2 : Coefficients de la régression des stations du groupe 1 pour les événements de type givre du réseau SYGIVRE.....	125
Table 4-3 : Coefficients de la régression des stations du groupe 1 pour tous les du réseau SYGIVRE	126
Table 4-4 : Coefficients de corrélation entre les variables des stations du groupe 1 du réseau SYGIVRE pour les événements de verglas.....	127
Table 4-5 : Coefficients de corrélation entre les variables des stations du groupe 1 du réseau SYGIVRE pour les événements de givre.....	127
Table 4-6 : Coefficients de corrélation entre les variables des stations du groupe 1 du réseau SYGIVRE pour tous les événements.....	127
Table 4-7 : Prédictions pour les stations du groupe 1 du réseau SYGIVRE pour les événements de verglas.....	128
Table 4-8 : Prédictions pour les stations du groupe 1 du réseau SYGIVRE pour les événements de givre	128
Table 4-9 : Prédictions pour les stations du groupe 1 du réseau SYGIVRE pour tous les événements	128
Table 4-10 : Paramètres de la régression pour les connexions des stations du groupe 1 du réseau SYGIVRE	130

Table 4-11 : Coefficients de la régression des stations du groupe 2 pour les événements de type verglas du réseau SYGIVRE.....	131
Table 4-12 : Coefficients de la régression des stations du groupe 2 pour les événements de type givre du réseau SYGIVRE.....	131
Table 4-13 : Coefficients de la régression des stations du groupe 2 pour tous les du réseau SYGIVRE.....	132
Table 4-14 : Coefficients de corrélation entre les variables des stations du groupe 2 du réseau SYGIVRE pour les événements de verglas.....	132
Table 4-15 : Coefficients de corrélation entre les variables des stations du groupe 2 du réseau SYGIVRE pour les événements de givre	133
Table 4-16 : Coefficients de corrélation entre les variables des stations du groupe 2 du réseau SYGIVRE pour tous les événements	133
Table 4-17 : Prédictions pour les stations du groupe 2 du réseau SYGIVRE pour les événements de verglas.....	134
Table 4-18 : Prédictions pour les stations du groupe 2 du réseau SYGIVRE pour les événements de givre	134
Table 4-19 : Prédictions pour les stations du groupe 2 du réseau SYGIVRE pour tous les événements	134
Table 4-20 : Paramètres de la régression pour les connexions des stations du groupe 2 du réseau SYGIVRE	136
Table 4-21 : Coefficients de la régression des stations du groupe 3 pour les événements de type verglas du réseau SYGIVRE.....	137

Table 4-22 : Coefficients de la régression des stations du groupe 3 pour les événements de type givre du réseau SYGIVRE.....	137
Table 4-23 : Coefficients de la régression des stations du groupe 3 pour tous les du réseau SYGIVRE.....	138
Table 4-24 : Coefficients de corrélation entre les variables des stations du groupe 3 du réseau SYGIVRE pour les événements de verglas.....	138
Table 4-25 : Coefficients de corrélation entre les variables des stations du groupe 3 du réseau SYGIVRE pour les événements de givre	139
Table 4-26 : Coefficients de corrélation entre les variables des stations du groupe 3 du réseau SYGIVRE pour tous les événements	139
Table 4-27 : Prédictions pour les stations du groupe 3 du réseau SYGIVRE pour les événements de verglas.....	140
Table 4-28 : Prédictions pour les stations du groupe 3 du réseau SYGIVRE pour les événements de givre	140
Table 4-29 : Prédictions pour les stations du groupe 3 du réseau SYGIVRE pour tous les événements	140
Table 4-30 : Paramètres de la régression pour les connexions des stations du groupe 3 du réseau SYGIVRE	142
Table 4-31 : Coefficients de la régression des stations du groupe 1 du réseau de PIM.....	143
Table 4-32 : Coefficients de corrélation des stations du groupe 1 du réseau de PIM.....	144

Table 4-33 : Prédictions pour les stations du groupe 1 du réseau de PIM	144
Table 4-34 : Paramètres de la régression pour les connexions du groupe 1 du réseau de PIM.....	146
Table 4-35 : Coefficients de la régression des stations du groupe 2 du réseau de PIM.....	147
Table 4-36 : Coefficients de corrélation des stations du groupe 2 du réseau de PIM.....	148
Table 4-37 : Prédictions pour les stations du groupe 2 du réseau de PIM	148
Table 4-38 : Paramètres de la régression pour les connexions du groupe 2 du réseau de PIM.....	150
Table 4-39 : Coefficients de la régression des stations du groupe 3 du réseau de PIM.....	151
Table 4-40 : Coefficients de corrélation des stations du groupe 3 du réseau de PIM.....	152
Table 4-41 : Prédictions pour les stations du groupe 3 du réseau de PIM	152
Table 4-42 : Paramètres de la régression pour les connexions du groupe de stations 3 du réseau de PIM.....	154

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 **Problématique**

Les précipitations givrantes sont des phénomènes météorologiques assez fréquents dans les régions froides comme le Canada, la Norvège, la France, la Chine, etc. Ce type de précipitation impose aux équipements extérieurs et à l'environnement des pressions énormes. En plus des dommages mécaniques, on observe souvent des pannes d'électricité dont la plus importante au Québec fut associée à l'épisode de verglas de janvier 1998, qui a affecté l'ensemble du réseau d'Hydro-Québec du sud du Québec.

Mis à part cet épisode exceptionnel, les tempêtes de givrage atmosphérique causent chaque année des dommages aux structures du réseau électrique, allant de la panne au bris d'équipement.

Les dépôts de glace engendrent des dommages mécaniques aux structures des lignes [19] [25], des courts-circuits [27] [42] et des problèmes de contournement [11] [12].

Quelle que soit la conception et la solidité des lignes aériennes, s'il se produit des tempêtes très violentes dont les effets dépassent les limites de conception des lignes et accessoires, il existe toujours un risque de dégâts provoqués par les charges de givrage atmosphérique. De plus, la présence du vent augmente largement ces risques.

La réduction de l'effet des charges de givrage atmosphérique sur les lignes aériennes peut prendre des formes différentes : méthodes de dégivrage, surveillance en temps réel des charges de givrage sur les lignes, modification du courant véhiculé dans les lignes de transport de façon à accroître les pertes joule et provoquer un dégivrage, revêtement anti-givre qui empêche l'adhérence de la glace sur les conducteurs, etc.

Une meilleure compréhension des phénomènes atmosphériques comme le verglas et le givre est nécessaire pour limiter ou éviter les pannes et les dommages mécaniques aux structures et principalement au réseau de transport d'électricité. La compréhension des phénomènes ne permet pas de les éviter mais tout au moins d'évaluer les risques, tout en conduisant à des normes de construction mieux adaptées ou à mieux organiser les techniques d'interventions à la réparation et à la maintenance des lignes pour les régions concernées

La répartition et l'évolution de tels phénomènes ne sont pas encore bien représentées par des modèles théoriques. C'est pourquoi, il faut analyser les

événements de givrage atmosphérique passés pour en retirer le maximum d'informations. C'est dans ce but qu'Hydro-Québec a mis en place un réseau de mesure des événements de verglas et de givre dès 1974 [14]. Les données recueillies par ce réseau, qui a compté jusqu'à 150 stations de mesure en opérations, sont aujourd'hui complétées par l'ajout d'un nouveau réseau qui génère automatiquement des données relatives à l'accumulation de glace sur les structures et dont la précision sur les mesures d'accumulation a été accrue.

L'étude de ces données s'est faite selon deux directions : la caractérisation de périodes de retour pour les valeurs extrêmes [9] [29] et la modélisation de la relation spatiale du risque sur le territoire [2] [9] [33].

Ce sont deux des multiples aspects du phénomène ; les données accumulées devraient permettre d'en étudier d'autres.

Un événement de givrage atmosphérique, tel qu'enregistré par les réseaux d'Hydro-Québec, est une donnée complexe de par sa nature spatiale et temporelle. Cette dernière ayant trois composantes : la saison durant laquelle le phénomène a lieu ; la période dans la saison et la durée de l'événement. La composante spatiale est, quant à elle, directement donnée par la répartition géographique des événements sur une région donnée.

Les chercheurs, au sein d'entreprises ou d'institutions concernées par le phénomène de givrage atmosphérique, se sont penchés sur plusieurs aspects concernant l'accumulation de précipitations froides sur les structures.

Le premier aspect concerne la mesure de ces phénomènes. Il est nécessaire d'utiliser des appareils de mesure adaptés à chaque situation. C'est pourquoi, nous retrouvons plusieurs études portant sur la mise au point ou l'amélioration d'appareils pouvant fournir manuellement ou automatiquement des données sur des accumulations de précipitations froides. Stein de Rosemount Aerospace Inc. [53], Laforte et al. de l'Université du Québec À Chicoutimi [35], s'occupant du dégivrage des ailes d'avions, McComber de l'E.T.S. [41], Hydro-Québec [22] [21], Claffey et Al. de l'U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory [4] pour le givrage des structures etc. ont procédé à des recherches sur ces appareils. Ces appareils sont développés en fonction des exigences et des caractéristiques de chaque domaine d'étude. Pour le réseau de transport de l'énergie électrique, deux appareils sont en exploitation. Le premier type est passif et manuel, le second est automatisé, basé sur le principe de Rosemount.

Malgré des appareils de plus en plus performants au fil des ans et des améliorations, l'évaluation réelle de la charge de l'accumulation sur les structures reste difficile à établir.

Environnement Canada, soucieuse de fournir des données exactes, a fait plusieurs études sur le givrage atmosphérique par l'intermédiaire de ses chercheurs. Ces études avaient pour but d'améliorer les connaissances de transposition des données provenant de matériels de mesure en données équivalentes sur les câbles en hauteur. Les appareils de mesure ne sont généralement pas placés directement dans les parties les plus concernées par les phénomènes mais à quelques mètres ; ceci pour des raisons pratiques. Il est donc nécessaire d'apporter des corrections aux données fournies par les instruments pour se rapprocher le plus possible de la réalité.

Chaîné et Castonguay [1] ont démontré dans leurs études que l'épaisseur radiale variable de glace sur un conducteur est fonction de la dimension de celui-ci. Il faut donc appliquer des facteurs de correction si un appareil est utilisé et qu'il ne correspond pas aux propriétés du câble. Savadjiev et al. [46] [49], Druetz et al. [8] se sont penchés sur ce problème de détermination de la valeur réelle des accumulations sur les câbles à partir de données fournies par des appareils de mesure.

Dans cet objectif d'évaluation des accumulations réelles, certains autres paramètres non météorologiques ou climatologiques ne sont pas à mettre de côté. Lu et al. [36] montrent dans leur étude que l'effet Joule est un facteur important à ne pas négliger dans les modèles d'estimation de la glace sur les conducteurs.

Nous constatons donc que la prise de mesure et la transposition en une valeur d'accumulation réelle sur les structures n'est pas aisée et nécessite des améliorations.

Le deuxième aspect concerne l'évolution des événements, c'est-à-dire l'introduction des aspects spatiaux et temporels de ceux-ci. Elle a commencé à être exploitée pour connaître les régions à risques (problèmes mécaniques : charge mécanique sur les structures, etc. et électrique : diminution des performances des isolateurs, etc.) et donc les endroits où les structures vont être les plus sollicitées.

Au sein d'Hydro-Québec, plusieurs chercheurs se sont penchés sur différents problèmes relatifs au givrage atmosphérique. Laflamme [32] démontre dans son étude l'importance d'étudier les événements de givrage atmosphérique comme étant des distributions temporelles et spatiales. Avant cela, les ingénieurs ne considéraient que l'aspect temporel pour concevoir les lignes de transport de l'énergie électrique.

Chouinard et al. [3] ont fait une étude sur le type de la distribution statistique qui peut être appliquée aux données concernant l'épaisseur de la glace autour des câbles des lignes de transmission de l'énergie électrique et ils ont construit une carte des régions à risques en fonction de l'intensité des événements de givrage atmosphérique. ElFashny et al. [9] ont déterminé, dans leur étude, les périodes de récurrence et les sévérités des événements à partir de données fournies par Hydro-Québec. Ils préconisent l'utilisation d'informations météorologiques et

topographiques en même temps que les données climatologiques pour les études statistiques.

Malgré toutes ces études, l'information contenue dans les données de givrage n'est pas exploitée à son plein potentiel.

De plus, au fil des ans, beaucoup de données seront enregistrées et devront être analysées.

1.2 Objectifs

Le présent travail s'inscrit dans le programme d'étude probabiliste du givrage atmosphérique de la Chaire Industrielle CRSNG / Hydro-Québec / UQAC sur le givrage atmosphérique des équipements des réseaux électriques (CIGELE).

L'objectif principal est de développer des méthodes statistiques d'analyse exploratoire sur des données d'événements de givrage atmosphérique provenant de stations de mesure automatisées réparties à travers la province de Québec.

Ces méthodes sont axées sur une meilleure compréhension de la distribution spatiale des événements de givrage et de verglas.

Les méthodes proposées sont adaptées à l'analyse des événements enregistrés par le réseau SYGIVRE mais comme ce dernier ne contient que peu d'années de mesure (6 années), la validation des outils se fera aussi sur les données provenant du réseau de PIM qui contient 25 ans de mesures.

Ce travail est basé sur les données fournies par Hydro-Québec au début du projet de recherche et bien que des mesures supplémentaires ou d'autres variables auraient été d'un intérêt certain, les délais pour les obtenir n'ont pas permis d'en tenir compte dans le cadre de ce travail.

Ces données disponibles ne permettaient pas de faire la différence entre le givre léger et le givre lourd ni de remettre en cause le type de précipitation enregistré dans la base de données.

Ces différences de précipitations sont très bien connues dans la littérature et nous ne nous attarderons pas à les redéfinir [43].

1.3 Méthodologie

La première étape du travail consiste à analyser et à décrire les deux principales bases de données disponibles d'Hydro-Québec. Une bonne connaissance des données des bases de données et des réseaux est nécessaire avant de faire des analyses plus sophistiquées ou d'entreprendre une modélisation. La description détaillée des bases de données est donnée dans le chapitre 2. La deuxième étape est la description, l'appropriation et la compréhension des données. Cette partie, représentée par le chapitre 3, proposera des outils d'analyse pour explorer les données et mieux comprendre le phénomène brut.

Le chapitre 4 s'intéresse à la spatialisation des événements qui est une caractéristique importante des phénomènes de givrage atmosphérique.

L'ensemble des traitements statistiques est fait à l'aide du logiciel S-PLUS. Ce dernier est particulièrement bien adapté pour faire des analyses spatiales et des analyses classiques dans le même temps. Par la puissance de son langage de programmation, il permet rapidement de concevoir les programmes mettant en œuvre les nouvelles méthodes d'analyse.

CHAPITRE 2

DESCRIPTION DES DONNÉES DISPONIBLES

CHAPITRE 2

DESCRIPTION DES DONNEES DISPONIBLES

Hydro-Québec est particulièrement impliqué dans l'étude des phénomènes d'accumulations de givrage atmosphérique sur les structures, que ce soit de par l'étendue de son réseau de transport d'énergie électrique ou de par le climat qui affecte ce réseau.

L'entreprise a mis en place deux réseaux de stations de mesure pour l'étude des précipitations givrantes. Le premier utilise des appareils de mesure manuels. Le principal instrument sur ces sites est un Passive Ice Meter (*PIM*) aussi appelé *glacimètre*. Le second, nommée SYGIVRE, utilise des appareils de mesure autonomes dont le principal se nomme Icing Rate Meter (*IRM*) ou encore *givromètre*.

2.1 Réseau SYGIVRE

En 1992, Hydro-Québec a mis en place un réseau de stations de mesure informatisé pour la cueillette de données sur le givrage atmosphérique. Les informations sont enregistrées en temps réel grâce à des liaisons par satellite, par ligne téléphonique ou par onde [22].

Les appareils de mesure, nommés givromètres, sont d'un genre nouveau [4] [53], ils sont capables de détecter des accumulations de givrage et de fournir les mesures automatiquement [22] via un système de transmission au système central.

Ce programme de mesures est implanté dans la province de Québec, principalement le long de la vallée du St Laurent, mais dans l'avenir, le réseau devrait couvrir l'ensemble de la province.

Ce réseau permet de recueillir des données météorologiques et climatologiques qui sont stockées dans une base de données.

2.1.1 Base de données

La notion d'événement de cette base de données est identique à l'autre base de données et sera caractérisée par la suite. Par contre, les mesures sont déterminées et fournies par le système informatique à partir du réseau de stations SYGIVRE. En effet, un événement est déclenché quand il se produit une accumulation sur la sonde du givromètre. Ce déclenchement se fait automatiquement par le système. À partir de ce moment, l'événement a lieu. Il est considéré comme terminé quand il n'y a plus de déclenchement du givromètre

pendant un certain temps variant de quelques heures à plusieurs dizaines heures suivant le type d'accumulation déjà présent.

Avec ce système, le cas de traces d'accumulations n'est pas détecté étant donné que le système repère une accumulation à partir d'un certain seuil (0,51 mm sur la sonde [22]).

Cette base se compose uniquement des valeurs des paramètres lors des événements de givrage atmosphérique. Les événements sont déterminés par le système via un algorithme utilisant divers paramètres (température, nombre de coups de givromètre, etc.). Les périodes de temps qui ne comportent pas d'événements ont été retirées de la base étant donné qu'elles ne sont pas pertinentes à l'étude du verglas ou du givre. Cela permet de réduire la taille de la base de données mais d'en conserver l'essentiel.

2.1.2 Les stations de mesure

Le réseau actuel comporte une trentaine de stations. Le programme de développement de cette base prévoit l'implantation d'une trentaine d'autres stations d'ici 2002 [31]. Ces stations sont réparties dans toute la province de Québec, à proximité des lignes de transport d'énergie électrique.

Une station de mesure standard donne 2 paramètres principaux : la température extérieure et l'épaisseur de glace accumulée. Les accumulations de

précipitations sont calculées au fur et à mesure que l'événement progresse et la température donnée est la température à l'instant de l'envoi des données.

Un type global d'accumulation est associé à chaque station. Ce dernier caractérise les principaux événements s'y produisant.

Nous trouvons donc des stations de mesure à dominance d'événements de verglas et d'autres à dominance d'événements de givre. Ceci est dû principalement à la position topographique des stations (positionnement dans une vallée ou sur une montagne). La carte de la figure 2-1 illustre le type global de l'accumulation par la taille des chiffres : une petite taille correspond à une station à dominance d'événements de verglas et une grande taille à une station à dominance d'événements de givre.

2.1.2.1 Répartition géographique

Les stations de mesure sont concentrées dans la région du St Laurent (figure 2-1), région avec une grande densité de lignes électriques donc plus sensible aux événements de givrage atmosphérique, très présents dans celle-ci.

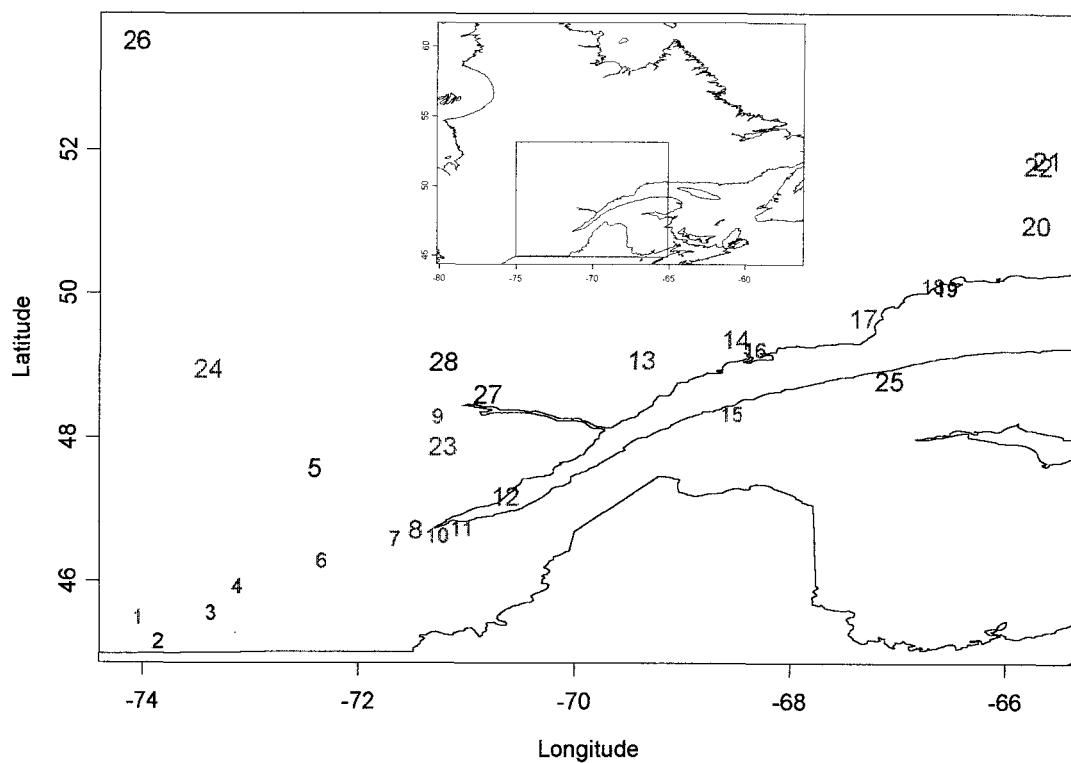


Figure 2-1 : Emplacements des stations du réseau SYGIVRE

2.1.2.2 Répartition temporelle

La répartition temporelle des stations est dynamique puisque le nombre de stations augmente au fil des ans malgré la fermeture de certaines d'entre-elles.

Nous sommes en présence d'un maximum de 6 saisons d'observations. Or, certaines stations ont été installées il y a quelques années seulement ou bien

certaines ont fermé ce qui implique que la période d'observations peut être plus courte.

La figure 2-1 indique, par la présence de couleurs, le nombre d'années d'observations pour chaque station. En bleu, les stations ont 6 années d'observations, en rouge, entre 2 et 5 années d'observations et en vert 1 seule année d'observations. 68% des stations ouvertes lors de la mise en place du système le sont restées jusqu'en 1998 (6 années d'observations). Durant les 5 années suivantes, 9 stations sont venues s'ajouter au réseau. Nous retrouvons 21% des stations qui n'ont qu'une année d'observations. 14% des stations ont fermé au cours de la période 1992-1998.

2.1.2.3 Caractérisation des paramètres disponibles

Dans ce réseau, nous retrouvons des paramètres concernant des données météorologiques et des données climatologiques. D'autre part, étant donné que c'est un système autonome, nous avons aussi des paramètres de contrôle des instruments de mesure. Les données fournies par cette base de données sont certifiées par Hydro-Québec, ce qui veut dire que les données ont été vérifiées et les erreurs corrigées. Elles ne nécessitent donc pas de traitement de vérification.

Des paramètres topographiques sont aussi présents, la longitude et la latitude en degrés, le nom du site de verglas et l'élévation du détecteur de verglas exprimée en mètre (élévation par rapport au niveau de la mer).

La date et l'heure de l'acquisition de chaque événement sont enregistrées.

2.1.2.3.1 Relevés météorologiques

La seule donnée météorologique disponible est la température extérieure exprimée en degré Celsius et précise au dixième de degré ; celle-ci correspond à la température instantanée prise à chaque heure.

2.1.2.3.2 Relevés climatologiques

Les paramètres climatologiques sont plus nombreux. En effet, nous avons un paramètre qui nous donne la dominance du dépôt accumulé durant l'heure écoulée : soit un dépôt de givre, soit un dépôt de verglas, un autre paramètre est le nombre de « coups de givromètre ». En effet, l'appareil de mesure détermine des épaisseurs fixes d'accumulation [22]. Donc, dès qu'il atteint cette valeur d'accumulation, il envoie un signal, nommé coup de givromètre, et enlève l'accumulation de sa sonde. Les derniers paramètres climatologiques sont le poids de la glace cumulé en gramme par mètre pour l'acquisition en cours et le poids de la glace cumulé en gramme par mètre pour l'événement jusqu'au moment de l'acquisition en cours. Ce dernier paramètre nous donne l'accumulation totale au fil des heures. Ceci est important car lors d'une accumulation, en fonction des conditions météorologiques, l'accumulation peut-être soit du verglas, soit du givre [22] et donc changer le taux de l'accumulation. Le système détermine cela automatiquement avec l'aide d'un algorithme conçu par Hydro-Québec et appelé

algorithme 9-23. Il sert à évaluer le poids de l'accumulation en fonction du type de givrage.

D'autre part, il existe un dernier paramètre servant dans le calcul du poids de la glace, c'est le facteur de pondération associé à chaque station traduisant une correction à apporter entre la valeur réelle de l'accumulation et la valeur calculée. Ce paramètre est fourni par Hydro-Québec.

2.1.2.3.3 Description du givromètre

Le givromètre (IRM : Icing Rate Meter), développé par Hydro-Québec, signale la présence d'un dépôt de verglas ou de givre (figure 2.2).

Le système de mesure est composé d'une sonde en forme de cylindre lisse de 6.2 mm de diamètre et de 25.4 mm de longueur [29] [41]. Un oscillateur force cette sonde sensitive à vibrer longitudinalement (parallèlement à son axe) à une certaine fréquence qui est de 40000 Hz sans la présence d'une accumulation.



Figure 2-2 : Appareil de mesure : le givromètre

Lors d'une accumulation sur la sonde, il y a un changement de la fréquence qui dépend du type d'accumulation. Suivant celui-ci, qui peut être de la glace, du givre ou bien de l'eau, le système de mesure ne répond pas de la même façon. S'il y a une accumulation de verglas ou de givre, on obtient une déviation négative de la fréquence. Dans ce cas, le détecteur entre dans une phase d'évacuation de l'accumulation. Il commence par chauffer la sonde puis la secoue par un système mécanique pour enlever toute eau afin d'éviter qu'elle ne gèle à nouveau sur la sonde et ne soit considérée comme une accumulation de verglas par la suite.

Dans le même temps, le système informatique enregistre un coup de givromètre correspondant à une épaisseur donnée puis repart en période d'accumulation.

S'il y a une accumulation d'eau, il se produit une déviation positive de la fréquence de résonance. Le détecteur entre dans une phase de nettoyage par chauffage et agitation de la sonde d'une manière mécanique.

L'émission d'un signal d'accumulation de verglas se traduit par une épaisseur correspondante de glace accumulée sur la sonde sensitive de 60 ± 2 mg [29].

Cet appareil de mesure est couplé à un système de traitement, d'analyse et d'envoi des données. Celui-ci est chargé de traiter les informations (sous forme d'impulsions) qui proviennent du givromètre. Par la suite, il se charge d'envoyer les données au système central qui se charge de les interpréter en fonction d'autres paramètres.

2.1.2.3.4 Avantages et inconvénients

Les avantages sont tout aussi nombreux que les inconvénients. En effet, plus le système devient compliqué, plus cela demande d'attention. Donc, en augmentant les performances des appareils, il intervient d'autres inconvénients à palier.

Étant donné que cet appareil est autonome, il ne nécessite pas d'opérateur pour faire les mesures. Seulement, par la complexité du système, il nécessite des techniciens plus qualifiés pour effectuer les maintenances. Ce système est plus cher à installer car il nécessite, outre un appareillage onéreux, un système

informatique permettant d'avoir l'accès en temps réel et des équipements auxiliaires eux aussi informatisés. Il faut mettre des thermomètres, des anémomètres, etc. autonomes, ce qui augmente le coût de l'installation mais rend les mesures plus précises.



Figure 2-3 : Position du givromètre

L'appareil de mesure est placé à une certaine hauteur (figure 2-3) (qui est donné comme paramètre) ce qui permet de se mettre plus près de la hauteur des lignes à haute tension et donc, il va être plus en mesure de recueillir les événements dus au brouillard givrant par exemple et donc de se rapprocher des conditions réelles d'accumulation proche de la ligne de transport de l'énergie électrique. Seulement, il est clair que l'appareil ne permet pas de connaître directement le poids ou l'épaisseur de l'accumulation présente sur la ligne, car cela repose sur un algorithme qui en fait la conversion. Le poids estimé peut donc être différent, malgré la précision de l'appareil sans cesse améliorée. Comme aucun

opérateur n'est présent sur place, il ne peut pas y avoir de vérification de chaque événement enregistré. Une vérification ultérieure est donc nécessaire.

2.2 Réseau de PIM

Le réseau de PIM a été mis en place en 1974 dans le but d'étudier les accumulations de givrage atmosphérique sur les conducteurs et les structures pour développer de meilleurs critères de design des lignes de transmission de l'énergie électrique [9] et de créer une base de données sur les événements de givrage atmosphérique [3]. Les stations qui la composent sont réparties dans l'ensemble de la province de Québec. La répartition de ces stations s'est faite le long des lignes de transport d'énergie électrique principalement. Dans les endroits à plus forte concentration de lignes électriques, le réseau de stations de mesure a une maille de l'ordre de 50 km [29]. Les stations sont essentiellement composées d'un appareil de forme standardisée collectant les accumulations de givrage atmosphérique. La mesure des épaisseurs des dépôts collectés constitue la principale donnée servant d'intrant à la banque de données. Pour certaines d'entre-elles (notamment des stations tests), d'autres paramètres sont enregistrés. Les stations ont été mises en place par Hydro-Québec bien que certaines d'entre-elles utilisent des sites de mesure déjà existant, en particulier sur les aéroports, où se trouvent déjà d'autres appareils de mesure. Le réseau de stations est dynamique dans le temps puisque certaines stations ont fermé en cours d'exploitation tandis que d'autres sont venues se greffer au réseau existant. Ainsi,

le nombre de stations en opération varie chaque année et les périodes d'observations peuvent varier d'une station à une autre. Ce réseau a donné naissance à une base de données sur les événements de givre et de verglas. Une mémoire de chaque événement de givre ou de verglas observé est enregistrée dans cette base de données. Cette base contient des mesures concernant le phénomène d'accumulation de glace ainsi que d'autres mesures sur les conditions météorologiques observées à la station pendant les événements.

L'ensemble de ces données constitue une importante source d'informations pour la connaissance du phénomène de formation du givrage sur les structures électriques du réseau de transport d'Hydro-Québec.

2.2.1 Enregistrement des données lors d'un événement de givrage atmosphérique

La base de données, issue du réseau de PIM, est construite sur la notion d'événement de givre ou de verglas, c'est-à-dire que seul les données prises lors d'un événement sont présentes dans la base. Un événement est défini comme étant toute la période entre le début d'une accumulation et le moment où le collecteur en est exempt. Le transfert des mesures dans la base de données pose quelques problèmes, soit, de définir qu'il y a eu effectivement une période de givrage atmosphérique et de déterminer le type de l'accumulation.

On considère qu'il y a événement lorsqu'il y a un dépôt de précipitations froides sur le glacimètre. Or la présence ou non d'un dépôt est déterminée manuellement par un opérateur qui doit observer le glacimètre. Théoriquement une accumulation substantielle sera notée. Par contre, pour de faibles accumulations, il se peut qu'elles ne soient pas repérées. La différenciation du type de dépôt (verglas ou givre dans notre cas) n'est pas aisée. Lors de phases d'accumulations successives, différents types peuvent apparaître mais un seul type d'accumulation est enregistré pour un événement. Reste donc à savoir quel est le type global à prendre en considération.

La période d'observations s'étend du 15 octobre au 15 mai pour les stations situées au sud du 50^{ième} parallèle et du 15 septembre au 15 juin pour celles situées au nord de celui-ci. Cette différence s'explique par la différence de température et de climat qui existe entre le nord et le sud de la province de Québec [21].

Un opérateur est chargé d'effectuer des observations à intervalles réguliers, deux fois par jour, le matin à 8h et l'après-midi à 18h. Il vérifie s'il y a dépôt sur le glacimètre et dans l'affirmative, il en fait la mesure. A partir du moment où il prend la première mesure, un événement a lieu et les données sont enregistrées aux heures de relevé. La fin d'un événement est caractérisée par l'absence de l'accumulation sur le glacimètre ou sur les câbles de transport de l'énergie électrique. Cette disparition se détermine visuellement par l'opérateur. Le collecteur donne des mesures de l'accumulation au niveau du sol, cela implique que des événements peuvent affecter les structures et les câbles sans que

l'instrument ne mesure le phénomène (brouillard givrant, givre de nuage, ...). De plus, la distance étant relativement grande entre l'opérateur et le câble, il lui est difficile de percevoir les faibles accumulations sur les câbles. Enfin, le glacimètre ne se trouve pas forcément tout de suite à proximité de la ligne électrique ce qui suppose d'autres approximations pour déterminer la présence du dépôt sur les structures en fonction du relief les séparant.

2.2.2 Format de la base de données

Les données sont traitées et mises en forme tous les ans à la fin de la période hivernale après traitements et vérifications des données transmises par les opérateurs. Ces traitements permettent d'enlever les aberrations, oublis, observations biaisées à cause d'une mauvaise approximation ou encore les incohérences au niveau des mesures [9]. L'ensemble des données est conservé sous format base de données informatisée, ce qui permet de les traiter plus facilement par la suite.

2.2.3 Les stations de mesure

Le programme d'installation du réseau a débuté en 1974 avec 35 stations. Dans les années qui suivirent, de nouvelles stations ont été ajoutées et d'autres retirées, remplacées ou transférées dans d'autres sites. En 1995, il y avait près de

150 stations installées au sein du réseau. A l'heure actuelle, il n'existe plus qu'une quarantaine de stations réparties principalement dans la vallée du St Laurent [23].

Un résumé des ouvertures et des fermetures des stations est donné par la figure 2-4.

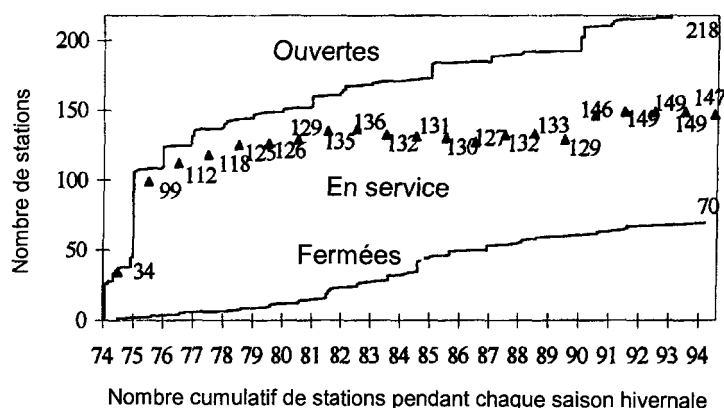


Figure 2-4 : États des stations dans le réseau de PIM [3]

Sur cette figure, on peut remarquer la progression du nombre de stations à travers la province du Québec. La courbe du haut donne le cumulatif des ouvertures de stations pour chaque année tandis que celle du bas donne le cumulatif du nombre de stations fermées. Les triangles du milieu indiquent les stations en opération.

Le nombre de stations a fortement progressé dans les premières années de l'installation du système puis, au fil des ans, il y a eu une stagnation dans l'augmentation du nombre de stations dans le système, mais toujours avec de nouvelles ouvertures et fermetures. De 1981 à 1995, il y a eu pratiquement le même nombre de stations en service. Cela se traduit par des stations comportant

de moins en moins d'années d'observations car elles ont été ouvertes de plus en plus récemment pour compenser les fermetures.

2.2.3.1 Répartition géographique

Ces stations sont principalement réparties dans le sud de la province, où se situe une concentration des lignes de transport et de distribution de l'énergie électrique ainsi qu'une concentration de la population. D'autre part, les événements de givrage atmosphérique sont concentrés en majorité le long de la vallée du St Laurent, d'où l'implantation très dense (maillage de 50 km) de stations de mesure dans cette région. Le programme de développement s'est limité aux endroits où passent des lignes électriques, principal intérêt de l'entreprise.

On retrouve donc la grande majorité des stations réparties autour du St Laurent : 80% et seulement 20%, dans le reste de la province.

2.2.3.2 Répartition temporelle

La période totale d'observations est de 26 ans soit de 1974 à 2000 et par conséquent il y a 26 saisons. Les données disponibles pour notre étude couvrent la période 1974/1995, soit 21 saisons. Les stations de mesure ayant été implantées au cours du développement du réseau, le nombre d'années d'observations varie pour chaque station.

Un grand nombre de stations (environ 45%) a une forte période d'observations (≥ 19 ans) ce qui veut dire qu'elles ont été installées dans les débuts de l'implantation du réseau. Pour de très faibles périodes d'observations (< 6 ans), il y a relativement peu de stations concernées (environ 15%). Ce faible nombre de stations montre une stagnation dans l'implantation de nouvelles stations.

Les cartes présentes sur les figures 2-5,2-6,2-7,2-8 montrent les stations actives durant les périodes 1974-1980, 1981-1985, 1986-1990, 1991-1995.

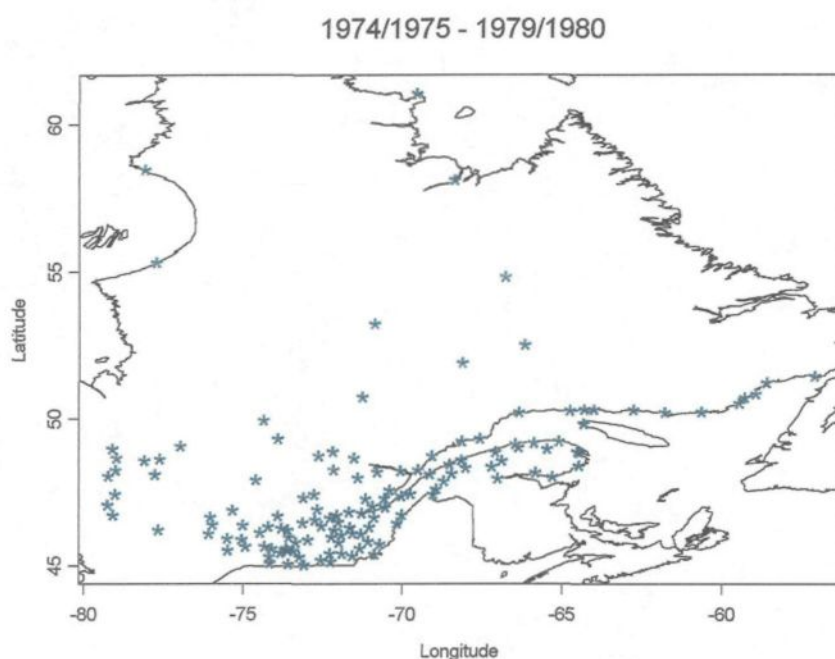


Figure 2-5 : Stations actives de juillet 1974 à juin 1980 (réseau de PIM)

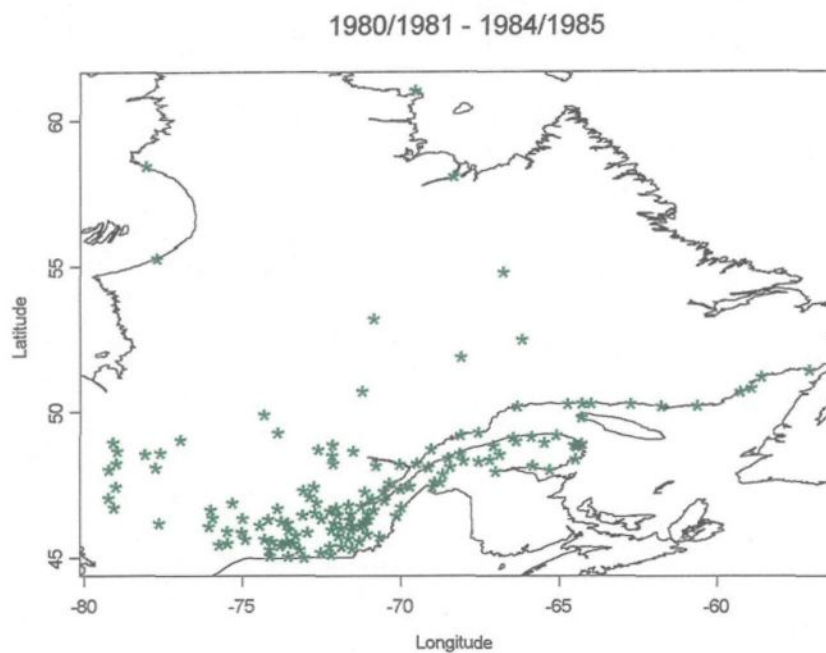


Figure 2-6 : Stations actives de juillet 1980 à juin 1985 (réseau de PIM)

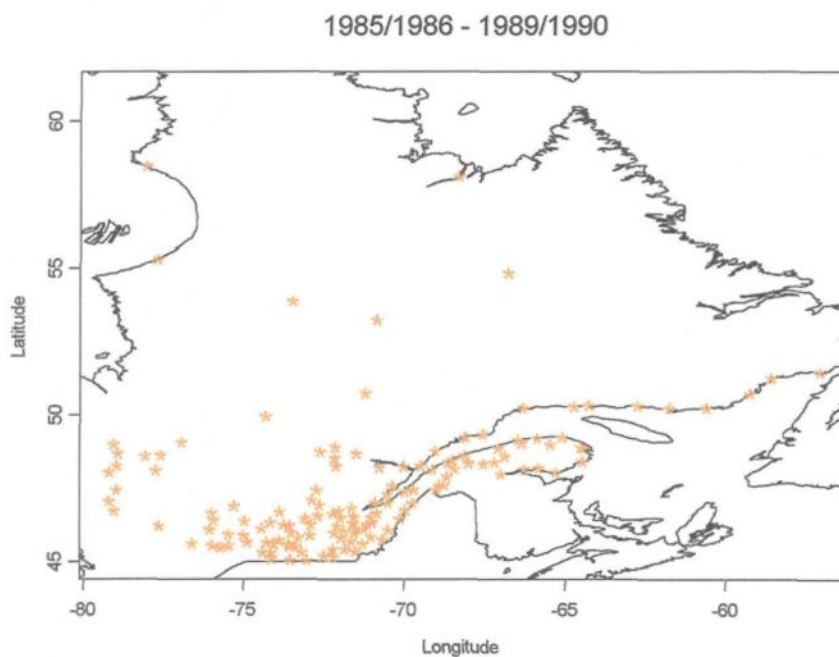


Figure 2-7 : Stations actives de juillet 1985 à juin 1990 (réseau de PIM)

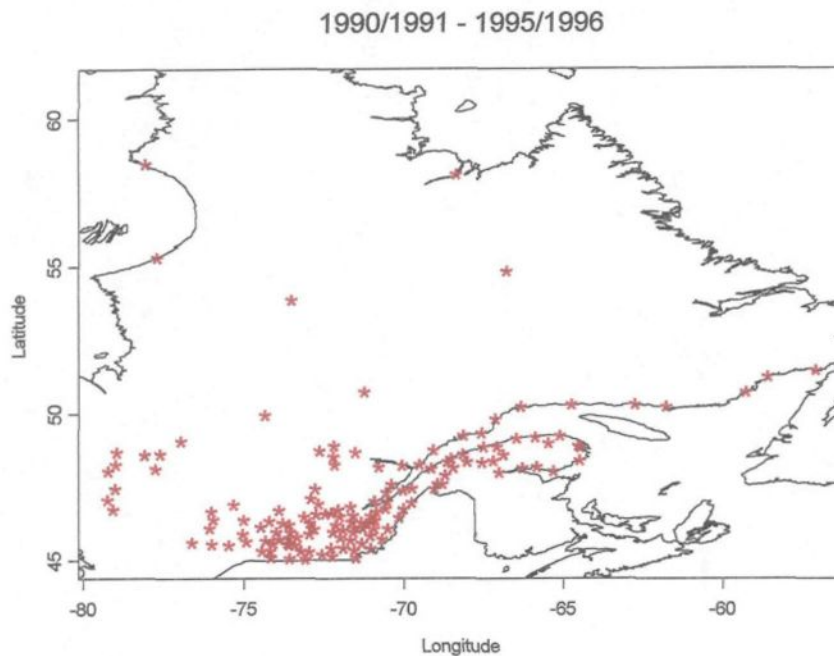


Figure 2-8 : Stations actives de juillet 1990 à juin 1996 (réseau de PIM)

Le nombre important de stations et d'années d'observations de ce réseau présente un grand intérêt dans l'étude des événements de givrage atmosphérique vu la masse importante de données disponibles.

2.2.3.3 Caractérisation des stations

La base de données fournie par Hydro-Québec comprenait 172 stations dont la position géographique était donnée et le nombre d'événements à chaque station permettait une analyse statistique.

L'erreur des valeurs théoriques de positionnement est de 0.1 degré de longitude et de latitude. Cela représente une erreur de positionnement de ± 2.5 km.

La carte de la figure 2-9 donne les localisations géographiques approximatives des stations de mesure utilisées.

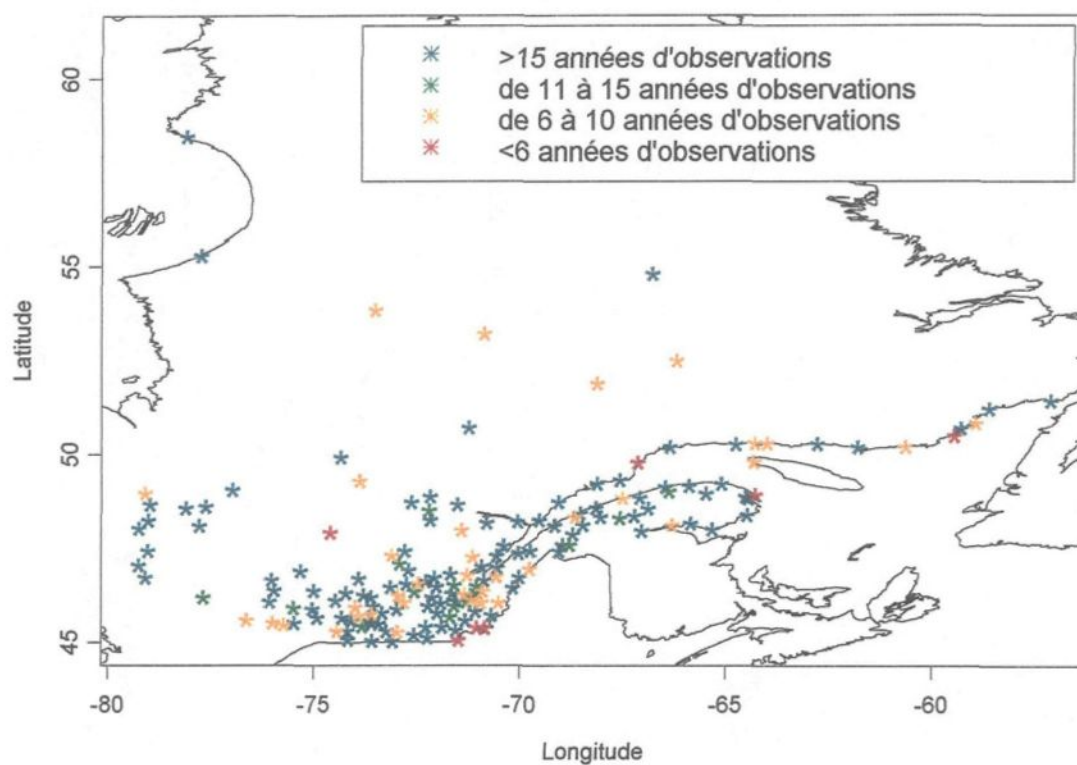


Figure 2-9 : Emplacements des stations du réseau de PIM

Près de 65% des stations ont une période d'observations supérieure à 15 années.

2.2.3.4 Caractérisation des paramètres de la base de données

Le réseau de PIM fournit des mesures de différents paramètres. Ceux-ci sont intégrés dans une base de données conditionnellement à la présence d'un événement de givrage atmosphérique. En l'absence d'événements, les différentes mesures ne sont pas enregistrées.

Pour chaque événement répertorié dans la base de données trois types de paramètres sont répertoriés : le premier, météorologique (vent, température, ...), le second, climatologique (précipitations verglaçantes, accumulation de neige, ...) et le troisième, général (heure, date, station, ...).

2.2.3.4.1 Relevés météorologiques

Les données météorologiques concernent les précipitations, les températures et le vent.

Les températures, exprimées en degrés Celsius, sont précises au dixième de degré près, Les valeurs sont celles prises lors du relevé des mesures, cela veut dire que nous ne tenons pas compte de la température lors de l'accumulation des précipitations froides.

Les mesures concernant le vent sont sa vitesse exprimée en kilomètre par heure et sa direction exprimée à l'aide des points cardinaux. La vitesse du vent est précise au kilomètre par heure et la direction est précise à 22.5 degrés.

Les hauteurs des précipitations sont mesurées depuis la dernière observation météorologique. La hauteur de la précipitation de pluie est précise au dixième de millimètre tandis que celle concernant la précipitation de neige est précise au dixième de centimètre.

Toutes ces données sont transcrites à la main sur des feuilles de relevés fournies par Hydro-Québec afin de normaliser les mesures de chaque station.

2.2.3.4.2 Relevés glacimétriques

Les relevés glacimétriques se font à l'aide d'un collecteur standardisé présente sur les figures 2-10 et 2-11. Il est connu sous le nom de PIM (Passive Ice Meter) ou glacimètre [21].

2.2.3.4.2.1 Mesures

Ce collecteur a été conçu pour évaluer les dépôts de glace sur une surface horizontale, quatre surfaces verticales (dirigées vers chacun des points cardinaux) et deux groupes de quatre cylindres.

Ces différentes surfaces permettent de caractériser les deux principaux constituant d'une ligne de transmission d'énergie électrique, à savoir les câbles et les structures de soutien de ces câbles (pylônes). Les surfaces planes vont représenter les éléments des pylônes (membrures) et les cylindres, les câbles

(câble de garde : protection du réseau contre la foudre et câbles haute tension : transport de l'énergie électrique).

Les cylindres qui modélisent les câbles à haute tension ont un diamètre de 25 mm. Ceux qui caractérisent les câbles de garde sont plus petits.

Toutes les formes de dépôts congelés qui adhèrent au glacimètre et qui ne peuvent être enlevées en soufflant dessus ou en étant balayées par la main, sont observées et sont donc considérées comme des événements.



Figure 2-10 : Collecteur standardisé : le glacimètre 1/2



Figure 2-11 : Collecteur standardisé : le glacimètre 2/2

L'appareil est passif dans le sens que les relevés sont faits par un opérateur. Ce dernier est chargé de faire les prises de mesures manuellement avec un pied à coulisse (représenté sur les figures 2-10 et 2-11). La lecture de la mesure se fait par l'opérateur qui la reporte sur la feuille de relevé standardisée. Les relevés concernant les heures de début et de fin des précipitations verglaçantes ou adhérentes sont extrapolés par l'opérateur menant à une précision d'une demi-journée. Le type de dépôt noté est l'un des 4 types suivants : givre, verglas, verglas et glaçons et autres. La précision de cette mesure vient avec l'expérience de l'opérateur, si bien qu'elle n'est pas évaluable.

Les différentes épaisseurs des accumulations, comme mentionnées auparavant, sont effectuées sur les différents constituants du collecteur. Ces données sont exprimées en millimètre (ce qui est leurs précisions). Les éventuels glaçons pouvant apparaître sont mesurés et notés à part.

2.2.3.4.2.2 Avantages et inconvénients du glacimètre

L'orientation du glacimètre déterminante pour évaluer l'épaisseur réelle qui se trouve sur les lignes de transmission de l'énergie électrique. Cette orientation étant normalisée, l'appareil ne se trouve pas forcément dans le même alignement (ou direction) que la ligne elle-même. Les accumulations relevées sur le glacimètre ne correspondront pas forcément (pour certaines stations) à l'accumulation réelle se trouvant sur les structures ou les câbles. L'appareil est dessiné pour évaluer l'accumulation de givrage atmosphérique sur les lignes de transmission de l'énergie électrique. Or il est placé au niveau du sol tandis que les câbles et les structures sont placés à plusieurs mètres au-dessus. On a donc une mesure qui peut différer passablement de celle qui serait prise directement sur les équipements, surtout dans le cas du givre.

D'autre part, les cylindres des glacimètres sont lisses, contrairement aux câbles qui sont toronés (entrelacement de brins de câbles en hélice). Cette caractéristique a des effets sur les accumulations et les délestages. Les précipitations auront tendance à mieux se fixer sur les câbles toronés que sur les cylindres lisses du fait de la surface complexe du câble. Une autre conséquence se situe au niveau du délestage. Celui-ci aura tendance à se produire plus facilement sur le cylindre fixe que sur le câble toroné car la glace est mieux accrochée sur ce dernier. Dans le cas de présence de vent cependant, le délestage des câbles peut en être facilité.

La rigidité des composants servant à la collection de glace (cylindres fixes) ne permet pas de reproduire le phénomène de torsion du câble. Ceci va se traduire par une accumulation que sur un seul coté du cylindre de mesure comme le montre la figure 2-12, avec présence ou non de glaçons, et non de manière plutôt uniforme comme ce qui se produit sur un câble réel présenté sur la figure 2-13. Grâce à la capacité de torsion, les câbles tournent avec l'effet de l'accumulation de précipitation et de la pesanteur, ce qui produit un manchon de glace (ou toute autre sorte d'accumulation) autour des câbles.

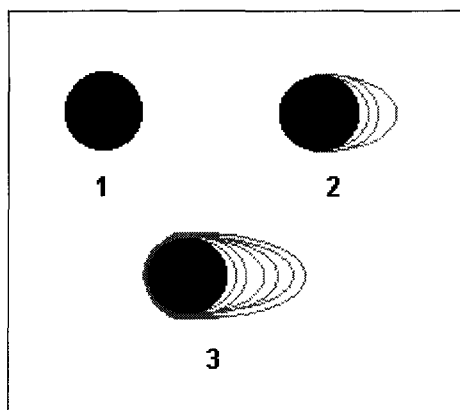


Figure 2-12 : Cycle d'une accumulation sur un cylindre lisse fixe

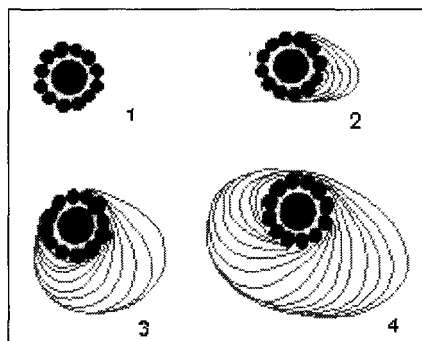


Figure 2-13 : Cycle d'une accumulation sur un câble ou un conducteur

Les premières phases (référéncées 1), pour chaque figure, présentent la section utilisée (cylindre, câble ou conducteur).

Sur la figure 2-12, les deux phases successives d'accumulation (2, 3) nous montrent clairement que l'accumulation ne se fait que d'un seul coté.

Sur la figure 2-13, les trois phases successives d'accumulation (2, 3, 4) nous montrent que par l'effet de la pesanteur et du déséquilibre dans l'accumulation, le câble se met à tourner ce qui contribue à l'obtention d'une accumulation plutôt uniforme autour du câble.

Enfin, les conducteurs, en particulier, sont parcourus par un courant électrique, ce qui crée un échauffement à leur surface tandis que les cylindres du glacimètre restent à la température ambiante.

Malgré les inconvénients, le glacimètre a l'avantage d'être facilement installé et ne nécessite pas d'entretien. Par sa simplicité de fonctionnement (utilisation par

un opérateur) et de fabrication (conception simple), il ne coûte pas cher à la réalisation et à l'implantation, ce qui en fait un instrument facile à mettre en place.

2.2.3.5 Caractéristiques des stations utilisées

Dans notre étude, nous n'utiliserons pas toutes les stations de la base de données sur les PIM, mais seulement une partie. En effet, nous nous servons de cette base pour des fins de validation et non d'étude à proprement dite. La figure 2-14 donne les positions des stations utilisées.

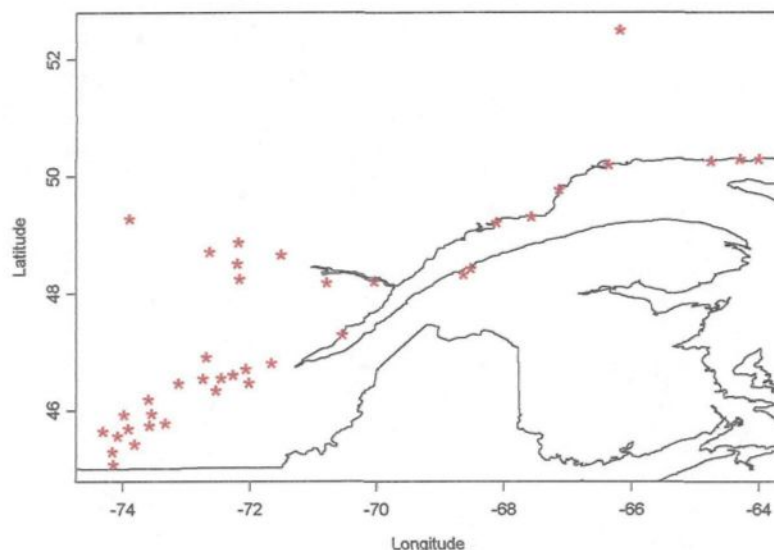


Figure 2-14 : Positionnement des stations retenues du réseau de PIM

Les stations ont été choisies de telle sorte qu'elles se trouvent à distance raisonnable des stations du réseau SYGIVRE. Dans ces conditions, la distance

séparant les stations du réseau de PIM ne doit pas être supérieure à 30 km d'une station du réseau SYGIVRE. Cette distance représente un bon compromis entre le nombre de stations concernées et la répartition géographique ; 28 stations ont été répertoriées. A celles-ci, nous avons jugé bon d'en rajouter quelques-unes afin d'améliorer la couverture spatiale de certaines régions. Nous avons retenu 4 stations sur la région du Lac St. Jean, 2 stations dans la région du Saguenay et 5 stations au niveau de la Côte Nord. De cette manière, la couverture spatiale des stations du réseau SYGIVRE est représentée par 39 stations du réseau de PIM.

Il y a, pour toutes les stations et toutes les années, 3133 événements répertoriés pour ce groupe de stations. Cela représente 19% des événements de la base complète pour 22,7% de stations utilisées.

2.2.4 Données utilisées

Toutes les données de tous les paramètres n'ont pas été utilisées car certaines n'étaient pas pertinentes ou disponibles.

2.2.4.1 Paramètre

Le seul paramètre utilisé est l'épaisseur radiale maximale sur les cylindres de 25 mm des glacimètres. Celui-ci est présenté de la manière suivante : un en-tête pour donner le nom de la station et une série de mesures.

Ces mesures se composent de la manière suivante : une date de début, une série de relevés d'épaisseurs et une date de fin.

2.2.4.2 Mesures

La qualité des données repose sur la qualité des mesures prises par les opérateurs et aux descriptions des conditions météorologiques et climatologiques réelles durant l'accumulation. Trois grands types d'erreurs peuvent se cumuler : une erreur liée aux opérateurs, une liée aux programmes informatiques et une liée à la forme de la glace.

Une accumulation peut être interprétée de différentes manières suivant la description qui y est faite par les opérateurs sur la feuille de relevé standardisée. D'autre part, des opérateurs prenaient des mesures de manières plus ou moins précises, ils avaient pour habitude d'arrondir les mesures à des valeurs approchées. C'est pourquoi, nous trouvons certains écarts entre les données.

Par la suite, les programmes informatiques font un pré-traitement de ces données en suivant des algorithmes précis qui sont basés sur des modèles d'accumulation idéaux, ce qui peut provoquer certaines erreurs si les données sont mal décrites.

Nous avons l'habitude de parler d'épaisseur radiale, c'est-à-dire une accumulation cylindrique uniforme autour du cylindre. Or, dans la nature, les accumulations peuvent prendre des formes totalement arbitraires, avec parfois, l'apparition de glaçons, il devient alors plus difficile de déterminer une épaisseur

radiale correspondante. De même, étant donné que le type d'accumulation et sa forme ne sont pas connus, nous ne pouvons pas en déduire l'épaisseur radiale réelle correspondante.

Les différentes valeurs des mesures que nous trouvons dans la base de données comportent des codes permettant de les caractériser. En effet, nous avons, outre les mesures réelles de l'épaisseur de givrage atmosphérique, les lettres *P* et *T* qui correspondent respectivement à une persistance de l'épaisseur mesurée précédemment et à des traces d'accumulation non mesurables précisément. Ces traces peuvent être considérées comme étant d'une épaisseur de 0.5 mm.

2.3 Caractérisation des événements de givrage atmosphérique

Les bases de données SYGIVRE et PIM sont construites autour de la notion d'événement de givre ou de verglas, caractérisée par la période allant du début de l'accumulation à la disparition de toutes traces. Cette notion, adoptée par Hydro-Québec, est adaptée à l'étude de la charge sur les lignes de transport et sur les structures, en général. Or pour l'étude du phénomène atmosphérique, relié au verglas ou au givre, il est nécessaire de considérer la notion de « tempête », c'est-à-dire l'événement lié aux conditions météorologiques causant l'accumulation.

La notion d'événement doit être modifiée pour ne considérer que la période d'accumulation. Cette définition permet de garder l'évolution spatiale et temporelle

à proprement dite de l'événement de givrage atmosphérique qui évolue dans le temps et dans l'espace. En effet, la notion d'événement d'Hydro-Québec n'est valide que localement. La période de persistance est dépendante des conditions météorologiques locales.

La base de données a été transformée de la manière suivante :

- chaque événement de la base a été décomposé en événements « élémentaires », c'est-à-dire qu'ils ne comprennent qu'une période d'accumulation et qu'une période de persistance. Ceci pour remédier aux éventuelles erreurs.
- par la suite, nous avons supprimé de l'événement la période de persistance dans l'objectif de notre étude.

Le nombre d'épisodes de givrage atmosphérique a naturellement augmenté, il est passé de 16146 à 16485. Cela représente une augmentation de 2,1%.

CHAPITRE 3

ANALYSE EXPLORATOIRE

CHAPITRE 3

ANALYSE EXPLORATOIRE

Les données relatives au givrage atmosphérique contenues dans les deux bases de données (SYGIVRE et sur les PIM) sont très complexes. Il y a une composante spatiale qui est essentiellement liée à la position géographique des stations, et trois composantes temporelles, l'année des événements, la durée de ceux-ci et la période dans l'année à laquelle a eu lieu l'événement. De plus, la quantité de données à analyser augmentera rapidement avec l'ajout de stations.

Des outils d'analyse sont nécessaires pour visualiser ces ensembles de données et retirer les principales caractéristiques ainsi que les regroupements spatiaux et temporels. Cela est fondamental dans le contexte de l'étude des précipitations givrantes puisque la connaissance du phénomène comporte bien des lacunes. Pour y remédier, il est donc nécessaire de définir des outils spécifiques pour traiter efficacement ces bases de données.

La première partie nous permet de faire ressortir les caractéristiques propres concernant des paramètres d'étude des stations (poids, température) et les caractéristiques des événements tandis que la deuxième partie s'intéresse aux

années pour vérifier si les observations de celles-ci doivent être analysées ensemble ou par sous-groupes d'années.

3.1 Description des variables

Les variables utilisées dans la base de données SYGIVRE doivent être décrites afin de connaître les particularités de chacune d'entre elles. Lorsqu'il y a des correspondances de variables entre les deux bases de données, celles-ci seront étudiées en même temps afin de pouvoir les comparer et de connaître les différences. Les variables disponibles sont le poids, la température et la durée des événements.

3.1.1 Poids de l'accumulation

Le poids de l'accumulation est sans doute la donnée la plus importante, celui-ci crée des problèmes mécaniques sur les structures dans le cas d'accumulations sévères ; il est indissociable des événements. Une description de ce paramètre permet de connaître la sévérité des épisodes de givrage atmosphérique.

3.1.1.1 Base de données SYGIVRE

La détermination du poids de l'accumulation est obtenue directement du réseau SYGIVRE. Pour chaque heure d'accumulation, une évaluation du poids est

établie et ensuite enregistrée. L'addition de chaque poids à chaque heure durant la période de l'événement donne le poids total de l'accumulation.

Selon que nous parlons d'accumulation de givre ou de verglas, le poids change. En effet, pour des accumulations de verglas, le poids peut atteindre des valeurs plus élevées que celui des accumulations de givre, ceci en raison de la densité du verglas comprise entre $0,8$ et $0,9 \text{ g/cm}^3$ plus forte que celle du givre lourd comprise entre $0,6$ à $0,87 \text{ g/cm}^3$ et moins de $0,6 \text{ g/cm}^3$ pour le givre léger.

Les deux cartes des figures 3-1 et 3-2 donnent une représentation moyenne du poids par station pour les événements de verglas et de givre. La grosseur des points est proportionnelle au poids moyen des accumulations entre les stations.

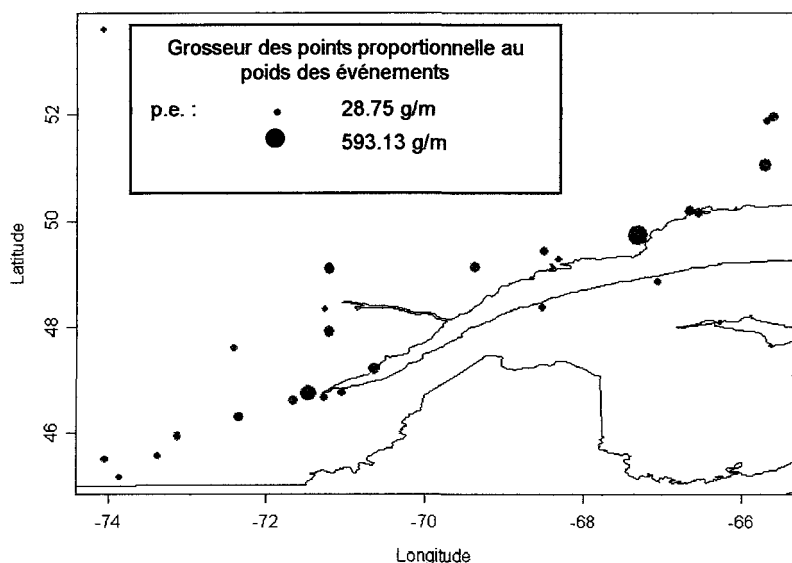


Figure 3-1 : Répartition du poids des accumulations de verglas pour le réseau SYGIVRE

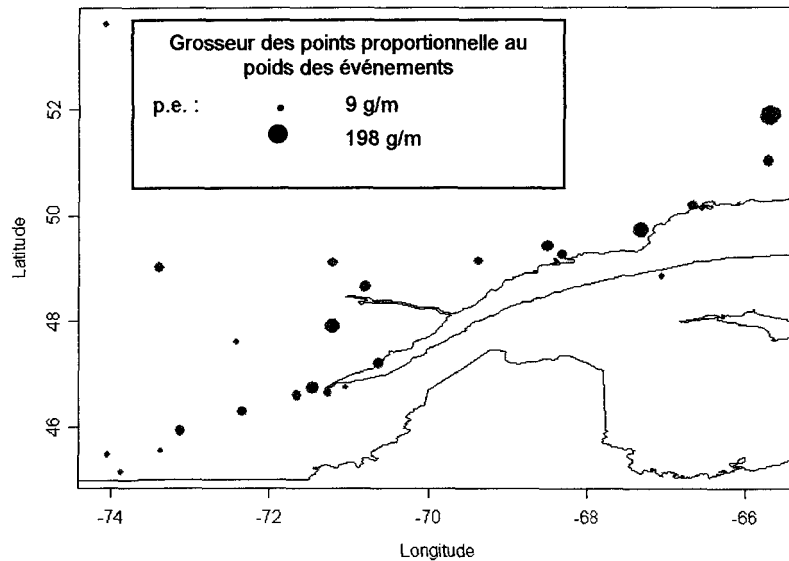


Figure 3-2 : Répartition du poids des accumulations de givre pour le réseau SYGIVRE

Les régions qui reçoivent les plus fortes accumulations sont la région de Québec et celle de la Côte Nord aussi bien pour le verglas que pour le givre.

Le poids moyen de l'accumulation pour l'ensemble des stations est de 209.5 g/m pour un écart type de 544.2 g/m pour le verglas, avec comme poids minimum et maximum de 7 g/m et 9773 g/m respectivement. La médiane est 49 g/m. Pour le givre, la moyenne est de 52.49 g/m pour un écart type de 162.6 g/m avec comme poids minimum et maximum de 3 g/m et 4419 g/m respectivement, la médiane étant de 9 g/m.

Nous constatons que les accumulations de givre sont moins importantes que celles de verglas. Les deux tables 3-1 et 3-2 nous donnent les principales statistiques pour chaque station, celles-ci sont exprimées en g/m.

Stations	Moyenne	Écart Type	Maximum	Minimum	Médiane	Nb. Événements
1	70,86	73,81	299	23	46	37
2	52,7	55,01	276	23	23	79
3	88,52	113,2	644	23	46	66
4	105,47	135,95	851	23	46	99
5	65,84	53,25	253	23	46	51
6	121,96	223,91	1196	23	46	76
7	134,05	293,08	2254	23	46	141
8	394,03	882,32	9773	18	92	323
9	28,75	11,5	46	23	23	4
10	83,53	112,6	644	23	46	76
11	81,38	95,53	506	23	46	65
12	194,76	337,16	2692	21	82,5	214
13	138,99	237,77	1396	18	54	135
14	103,7	159,2	1387	21	42	115
15	77,72	79,3	276	23	23	29
16	54,94	43,31	207	23	46	18
17	593,13	1125,26	6969	23	138	208
18	159,24	295,4	2466	16	64	142
19	122,08	210,78	920	23	46	26
20	275,17	524,25	3932	21	103	167
21	102,52	222,66	2316	9	22,5	176
22	55,58	71,03	276	23	34,5	12
23	196	263,72	912	21	83	25
24	NA	NA	NA	NA	NA	1
25	70,03	113,91	691	7	28	62
26	37	39,84	83	14	14	3
27	NA	NA	NA	NA	NA	0
28	175,75	375,18	1325	18	27	12
Base entière	209,45	544,21	9773	7	49	2362

Table 3-1 : Statistiques pour le poids des accumulations de verglas pour les stations du réseau SYGIVRE

Stations	Moyenne	Écart Type	Maximum	Minimum	Médiane	Nb. Événements
1	13,50	6,36	18	9	13,5	2
2	9,00	0,00	9	9	9	2
3	9,82	2,71	18	9	9	11
4	60,75	130,09	540	9	18	20
5	12,68	8,63	45	9	9	22
6	45,82	55,40	153	9	18	11
7	47,08	59,39	243	9	18	26
8	80,36	223,38	2748	7	14	491
9	NA	NA	NA	NA	NA	0
10	31,50	31,82	54	9	31,5	2
11	9,00	0,00	9	9	9	4
12	60,50	118,66	989	8	16	217
13	40,79	68,14	518	7	14	242
14	73,35	151,22	1255	8	24	187
15	NA	NA	NA	NA	NA	0
16	41,63	43,01	126	9	22,5	8
17	112,71	313,57	4419	9	27	285
18	42,44	69,14	339	6	12,5	72
19	9,00	NA	9	9	9	1
20	64,28	176,16	2689	8	8	652
21	13,30	33,10	470	4	4	741
22	198,00	NA	198	198	198	1
23	106,12	295,37	1445	8	8	33
24	54,00	NA	54	54	54	1
25	11,88	22,57	137	3	3	88
26	12,60	23,45	216	5	5	227
27	70,67	137,79	836	8	16	80
28	51,02	163,13	2363	7	9	290
Base entière	52,49	162,63	4419	3	9	3716

Table 3-2 : Statistiques pour le poids des accumulations de givre pour les stations du réseau SYGIVRE

La présence de « NA » dans les tableaux signifie que la statistique n'a pu être établie. Celle-ci apparaît lorsqu'une ou aucune valeur est présente à la station.

Les valeurs minimales sont conditionnées par l'algorithme utilisé dans l'évaluation du poids (elles devraient être de 9 g/m pour du givre et 23 g/m pour du verglas) or pour des raisons inconnues, il apparaît que les valeurs utilisées par l'algorithme peuvent varier.

Dans le cas de la station 21 pour des données d'accumulation de verglas, la valeur minimale est de 9 g/m. Or, cette valeur correspond à une accumulation de type givre. Si bien qu'il est probable que le système informatique a commis des erreurs ou a été changé. Malheureusement, nous n'avons aucun moyen de le vérifier.

Les tableaux 3-3 et 3-4 montrent les principales statistiques pour le poids des accumulations dans le cadre des saisons.

Saisons	Moyenne	Écart Type	Maximum	Minimum	Médiane	Nb. Événements
1992/1993	176.64	320.77	2466	7	46	169
1993/1994	184.18	330.56	2010	7	55	406
1994/1995	336.13	887.79	9773	9	92	288
1995/1996	240.91	706.99	6463	9	62	475
1996/1997	193.94	430.71	4117	9	62	503
1997/1998	155.97	377.65	3818	9	46	520

Table 3-3 : Statistiques pour le poids des accumulations de verglas par saison pour le réseau SYGIVRE

Saisons	Moyenne	Écart Type	Maximum	Minimum	Médiane	Nb. Événements
1992/1993	47.04	117.67	1539	3	9	854
1993/1994	27.38	75.79	1304	3	8	1176
1994/1995	102.83	275.26	2748	3	14	440
1995/1996	66.66	134.30	1240	4	16	350
1996/1997	54.00	112.21	989	4	9	458
1997/1998	67.02	272.02	4419	4	9	438

Table 3-4 : Statistiques pour le poids des accumulations de givre par saison pour le réseau SYGIVRE

La saison 1994/1995 a connu de gros épisodes de givrage atmosphérique autant au niveau du verglas que du givre. La saison comportant de faibles taux

d'accumulation est différente que nous parlions d'événements de givre ou de verglas ; pour le verglas, c'est la saison 1997/1998 et pour le givre, la saison 1993/1994.

Le nombre d'événements qui ont un poids supérieur à 9072 g/m (valeur limite de conception des lignes) est de 1 événement pour les accumulations de verglas et 0 pour celles relatives au givre. Cet événement s'est produit à la station 8 (station Mont-Bélair près de Québec) en 1994/1995 pour une précipitation qui a duré 33h30. Comme une phase de persistance existe après chaque accumulation, il se peut qu'il y ait donc plusieurs accumulations s'accumulant et non une seule. Le durée totale de l'accumulation devient grande et l'accumulation finale peut être importante. En résultat, de plus grands risques de défaillance sont présents.

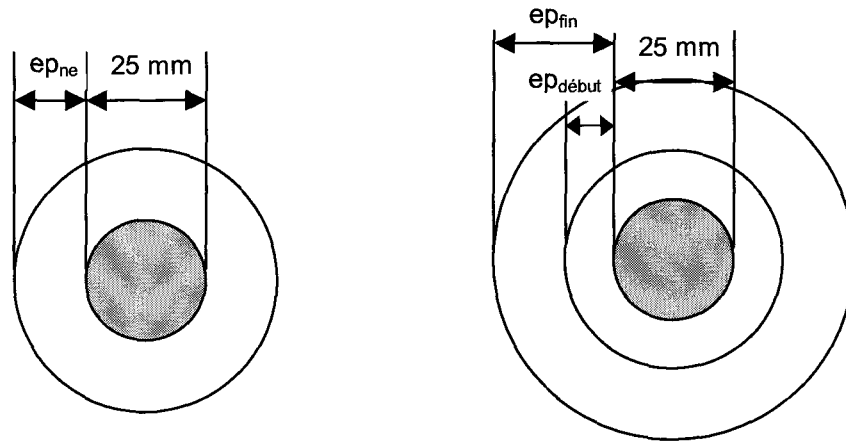
Par ailleurs, la saison 1993/1994 a reçu beaucoup d'événements de givre tandis que c'est la saison 1997/1998 qui a reçu le plus d'événements de verglas.

3.1.1.2 Évaluation de l'épaisseur des accumulations des événements pour la base de données sur les PIM

Le poids des accumulations n'est pas disponible dans cette base de données mais nous pouvons tout de même faire une comparaison avec l'épaisseur étant donné que ces deux paramètres sont liés. Le type de dépôt n'est pas connu, c'est

pourquoi il n'y a pas de différence de faite et l'ensemble des données est considéré à chaque fois.

Lorsqu'il y a une accumulation sur le collecteur, il ne suffit pas de soustraire l'épaisseur présente à celle qui se trouvait au début de l'accumulation pour obtenir la nouvelle accumulation puisque, comme le montrent les figures 3-3 et 3-4, cela ne correspond pas à la même accumulation sans glace résiduelle au début :



Figures 3-3 et 3-4 : Une ou plusieurs accumulations

La valeur de l'épaisseur calculée était inférieure à la valeur réelle d'où une sous-estimation de la réalité. Nous considérons donc la formule décrite par l'équation 3-1.

$$ep_{ne} = \frac{\sqrt{(2ep_{fin} + 25)^2 - (2ep_{début} + 25)^2 + 25^2} - 25}{2}$$

Eq. 3-1

Celle-ci nous donne l'épaisseur réelle équivalente dans le cas où l'accumulation serait de type circulaire. Dans le cas d'accumulation de forme quelconque, nous aurons seulement une estimation de l'épaisseur réelle. Nous pouvons donc constater que la précision de la mesure est aussi lié au phénomène.

Nous remarquons qu'environ 75.1% des événements ont une épaisseur inférieure à 5mm et environ 95.5% en ont une inférieure à 20 mm. Cela se traduit par une très forte majorité d'événements de petite intensité.

En regroupant toutes les stations et toutes les années d'observations propres à chacune d'entre elles, en moyenne, une épaisseur de 4,35 mm est observée par événement. Seulement, en réalité, il y a beaucoup d'événements qui ont une épaisseur égale à 1mm (précision du collecteur) et seulement quelques grandes épaisseurs qui font augmenter la moyenne. Si nous nous basons sur la norme de construction d'Hydro-Québec, regardons les événements qui ont une épaisseur maximale de 45 mm, limite utilisée pour le dimensionnement des lignes de transport de l'énergie électrique. En effet, au-delà de cette épaisseur, la ligne risque d'avoir des ruptures mécaniques. La proportion d'événements ayant une accumulation inférieure à 45 mm est de 99,24%. L'épaisseur moyenne est de 3,66mm, ce qui correspond à de petits événements.

La moyenne des événements ayant une épaisseur supérieure à 45 mm (0.76% des événements de la base de données) est de 90,02 mm, ce qui correspond finalement à de grandes accumulations. Donc, lorsque les

accumulations des événements dépassent les limites de conception des structures, elles les dépassent en moyenne très largement.

Le tableau 3-5 suivant nous donne les statistiques pour chaque station pour ce qui est de l'accumulation totale par année.

Stations	Moyenne	Écart type	Maximum	Minimum	Médiane	Nb. Événements
1	12.94	60.86	21.42	1.00	3.00	15
7	22.75	66.95	14.73	2.81	22.73	146
19	14.42	38.02	11.26	1.00	14.55	176
27	15.59	89.18	22.82	1.00	5.00	70
32	15.40	50.41	13.32	1.00	14.80	80
37	7.91	27.80	7.75	1.00	5.36	39
45	28.24	172.12	38.98	1.00	11.31	111
50	11.14	32.87	10.39	1.00	7.62	60
52	45.40	380.61	81.08	1.00	25.86	156
54	70.53	973.24	213.02	3.82	18.92	131
70	12.90	13.54	0.66	12.28	12.88	36
72	25.91	65.50	27.65	1.00	16.02	25
73	17.95	65.33	15.10	1.00	15.69	216
92	7.41	14.96	6.54	3.63	3.63	15
93	5.71	54.63	12.68	1.00	1.00	22
94	30.47	91.16	29.14	3.63	20.50	159
97	21.24	34.60	11.38	1.00	19.72	104
99	1.77	5.00	1.91	1.00	1.00	11
102	24.84	54.30	10.89	10.66	21.54	129
104	15.49	66.79	17.07	1.00	9.93	136
105	6.86	18.00	7.10	1.00	4.71	49
108	6.55	25.13	8.20	1.00	5.40	16
109	16.71	62.89	16.40	1.00	13.54	64
111	10.26	51.20	12.53	1.00	7.82	63
113	14.06	45.59	13.11	1.00	10.81	110
122	15.73	36.76	9.76	1.93	15.11	121
133	18.92	29.76	8.56	7.25	17.00	50
135	11.27	32.34	9.87	1.00	10.31	65
137	21.56	42.27	10.14	5.40	21.19	57
140	12.00	59.83	14.41	1.00	6.58	89
141	15.50	31.59	9.11	3.63	14.01	140
144	19.38	31.86	8.84	7.66	17.50	25
147	15.86	110.92	25.84	1.93	7.15	79
149	6.83	14.49	5.31	1.00	6.13	17
153	21.90	80.41	19.40	1.00	19.09	122
154	8.99	55.30	12.84	1.00	5.00	44
159	12.70	59.68	15.03	1.00	9.73	98
164	12.49	33.46	10.75	1.00	11.69	27
169	8.18	48.84	13.23	1.00	3.63	60

Table 3-5 : Statistiques pour les épaisseurs totales par station des accumulations pour le réseau de PIM

Le tableau 3-6 suivant nous donne les principales statistiques pour les événements pour chaque saison de givrage atmosphérique.

Saisons	Moyenne	Écart Type	Maximum	Minimum	Médiane	Nb. Événements
1974/1975	6.79	9.61	30	1	3	30
1975/1976	7.32	14.82	165	1	3	212
1976/1977	5.55	6.69	31	1	3	106
1977/1978	5.60	7.85	45	1	2	110
1978/1979	7.23	31.71	375	1	1	160
1979/1980	5.92	9.53	60	1	1.5	118
1980/1981	5.12	6.64	43	1	2	164
1981/1982	6.78	9.87	55	1	3	121
1982/1983	6.66	8.85	55	1	3	167
1983/1984	7.69	10.42	69	1	3.5	165
1984/1985	6.48	10.14	60	1	2	141
1985/1986	13.86	84.43	970	1	3	162
1986/1987	5.01	6.31	25	1	1	88
1987/1988	2.75	3.41	20	1	1	102
1988/1989	4.38	6.73	32	1	1	113
1989/1990	4.28	5.72	44	1	1	123
1990/1991	3.67	5.21	57	1	2	243
1991/1992	4.04	4.55	27	1	2	223
1992/1993	2.83	4.84	52	1	1	227
1993/1994	2.66	4.89	33	1	1	166
1994/1995	2.84	3.23	15	1	1	192

Table 3-6 : Statistiques pour l'épaisseur des accumulations par saison pour le réseau de PIM

Il est intéressant de constater que l'année 1994/1995 n'est pas particulièrement importante bien que ce soit une année de forte accumulation pour le réseau SYGIVRE, la moyenne des accumulations est petite par rapport à la moyenne globale et les trois années 1992/1993, 1993/1994 et 1994/1995 sont identiques tant au niveau du nombre d'événements que de l'accumulation moyenne. Pour le réseau SYGIVRE, l'accumulation moyenne est très forte en

1994/1995 tandis qu'il y a beaucoup plus d'événements en 1993/1994. Cette différence ne peut-être due à la répartition géographique des stations puisque les données analysées pour le réseau de PIM sont constituées d'un sous-groupe de stations géographiquement proches des stations SYGIVRE.

3.1.2 Températures d'acquisitions.

Les accumulations de givre ou de verglas apparaissent pour des températures extérieures différentes. La norme pour la température d'une précipitation de type verglas est comprise entre 0 et -3°C tandis que celle pour une accumulation de type givre, les températures sont comprises entre -3 et -15°C . Ces limites caractéristiques sont bien décrites dans la littérature [43] et nous les prenons telles qu'elles.

Pendant la période d'accumulation de l'épisode de givrage atmosphérique, la température peut varier. C'est une des raisons pour laquelle l'accumulation peut être constituée à la fois de givre et à la fois de verglas.

Suivant les données de SYGIVRE, la température moyenne des accumulations de givre est de $-10,71^{\circ}\text{C}$. La température moyenne des accumulations de verglas est de $-0,99^{\circ}\text{C}$. En moyenne, lors d'épisodes de verglas, la température ne reste pas constante et tend à augmenter, celle-ci passant de $-1,03$ à $-0,89^{\circ}\text{C}$. Pour les épisodes de givre, elle reste en moyenne constante avec peut-être une légère diminution et passe de $-10,73$ à $-10,78^{\circ}\text{C}$.

Nous noterons que certains événements n'ont pas la température propice au type de l'accumulation répertorié. Cela représente 13,9% des événements de givre et 2,24% des événements de verglas. Ceci peut-être du à une mauvaise évaluation des types de dépôt ou à de cas exceptionnels.

Les histogrammes des figures 3-5 et 3-6 montrent la répartition de la température des événements.

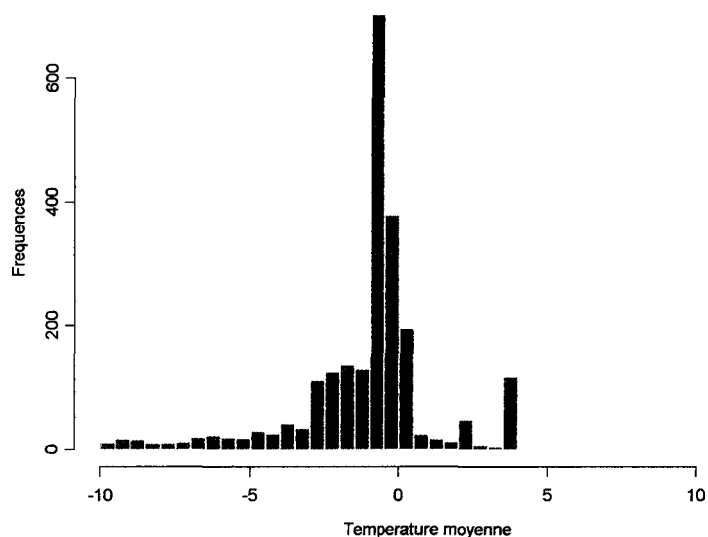


Figure 3-5 : Histogramme de la température des événements de verglas du réseau SYGIVRE

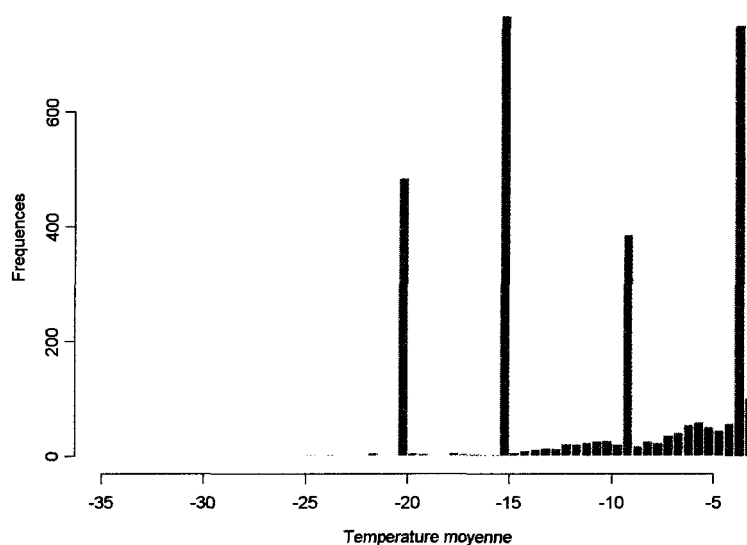


Figure 3-6 : Histogramme de la température des événements de givre du réseau SYGIVRE

L'histogramme sur les événements de givre montre que certaines valeurs reviennent souvent : -20 , -15 , -9 et -3.5 °C. De plus, il n'y a que certaines stations qui ont cette caractérisation (stations 4, 7, 12, 13, 14, 18, 20, 21, 26, 27, 28). Ces fréquences particulièrement élevées indiquent que l'instrument de mesure de la température utilisé a une précision très faible ou une erreur de calibrage.

Nous remarquons que ces stations ont été ouvertes pour la première saison de givrage atmosphérique du réseau et ces « paliers » sont présents depuis le début.

Les deux tableaux 3-7 et 3-8 donnent les principales statistiques pour les températures d'accumulation pour chaque station.

Stations	Moyenne	Écart-Type	Maximum	Minimum	Médiane	Nb. Événements
1	-3.40	2.55	2.50	-8.30	-3.80	37
2	-2.77	3.07	3.00	-9.80	-2.18	79
3	-2.93	3.36	2.00	-9.80	-1.90	66
4	-2.30	3.27	5.80	-9.90	-0.91	99
5	-0.04	2.34	11.57	-2.90	-0.10	51
6	-2.51	2.82	1.50	-9.50	-1.58	76
7	-2.53	2.93	2.00	-9.80	-1.65	141
8	-1.55	1.60	7.10	-9.60	-1.50	323
9	-2.82	3.38	0.30	-5.80	-2.90	4
10	-2.20	2.45	0.80	-9.50	-1.70	76
11	-1.38	1.97	2.40	-9.70	-1.00	65
12	-0.22	0.89	4.00	-0.50	-0.50	214
13	0.27	1.52	4.00	-0.50	-0.50	135
14	0.27	1.50	4.00	-0.50	-0.50	115
15	-1.80	1.73	0.18	-5.20	-0.96	29
16	-0.80	3.62	4.00	-9.00	-0.50	18
17	-1.33	1.29	3.80	-8.70	-1.13	208
18	0.05	2.93	4.00	-9.00	-0.50	142
19	-1.44	3.11	0.60	-9.40	0.00	26
20	0.56	1.81	4.00	-0.50	-0.50	167
21	0.59	1.53	4.00	-0.50	-0.39	176
22	-0.30	0.76	0.90	-1.50	-0.08	12
23	-0.66	1.33	3.05	-2.57	-0.55	25
24	NA	NA	NA	NA	NA	1
25	-2.02	2.26	0.90	-8.70	-1.41	62
26	-0.50	0.00	-0.50	-0.50	-0.50	3
27	NA	NA	NA	NA	NA	0
28	0.50	0.00	0.50	0.50	0.50	12
Base entière	-0.99	2.39	11.57	-9.90	-0.50	

Table 3-7 : Statistiques pour les températures des événements de verglas

Stations	Moyenne	Écart-Type	Maximum	Minimum	Médiane	Nb. Événements
1	-10.75	0.78	-10.20	-11.30	-10.75	2.00
2	-16.10	8.20	-10.30	-21.90	-16.10	2.00
3	-13.15	5.51	-10.50	-29.60	-11.80	11.00
4	-14.89	4.10	-7.20	-23.10	-15.00	20.00
5	-5.36	2.06	-3.10	-9.35	-4.75	22.00
6	-12.41	5.83	-5.60	-26.73	-11.50	11.00
7	-16.24	3.65	-10.00	-20.00	-15.00	26.00
8	-8.72	5.48	-2.80	-31.50	-7.12	491.00
9	NA	NA	NA	NA	NA	0.00
10	-13.64	1.50	-12.58	-14.70	-13.64	2.00
11	-13.27	4.43	-10.70	-19.90	-11.25	4.00
12	-7.95	6.18	-3.50	-20.00	-3.50	217.00
13	-8.63	6.93	-3.50	-20.00	-3.50	242.00
14	-11.42	7.58	-3.50	-20.00	-9.00	187.00
15	NA	NA	NA	NA	NA	0.00
16	-19.38	1.77	-15.00	-20.00	-20.00	8.00
17	-7.73	5.45	-3.00	-35.00	-5.99	285.00
18	-16.11	2.09	-15.00	-20.00	-15.00	72.00
19	-10.00	NA	-10.00	-10.00	-10.00	1.00
20	-9.01	5.68	-3.50	-20.00	-9.00	652.00
21	-11.21	4.70	-3.50	-20.00	-15.00	741.00
22	-10.15	NA	-10.15	-10.15	-10.15	1.00
23	-8.18	5.75	-3.00	-26.70	-6.20	33.00
24	-20.00	NA	-20.00	-20.00	-20.00	1.00
25	-9.80	6.85	-3.07	-30.70	-7.15	88.00
26	-17.17	2.49	-15.00	-20.00	-15.00	227.00
27	-18.43	2.34	-15.00	-20.00	-20.00	80.00
28	-18.19	2.41	-15.00	-20.00	-20.00	290.00
Base entière	-10.71	6.18	-2.80	-35.00	-9.00	

Table 3-8 : statistiques pour les températures des événements de givre

La moyenne des températures des événements de verglas est de $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ et pour ceux de givre, de $-10.71\text{ }^{\circ}\text{C}$, ce qui correspond aux températures adéquates pour la formation de chacun de ces deux types de dépôt. Malheureusement, la température pour les événements du réseau de PIM n'était pas disponible ce qui empêche de vérifier si les paliers observés sur la base de données SYGIVRE sont aussi présents à certaines stations du réseau de PIM.

3.2 Caractérisation des stations

Les stations des deux bases de données comportent des mesures différentes que nous allons caractériser dans cette partie.

La mise en service du réseau SYGIVRE ne date pas de longtemps ce qui fait qu'elle dispose d'avancées technologiques récentes et offre des services plus adaptés à l'étude du phénomène de givrage atmosphérique. En plus de la précision des mesures, un intérêt de ce réseau est l'accès en temps réel aux données provenant des sites de mesure. Cet accès permet de suivre les évolutions des épisodes de givrage à travers la province de Québec. Il sera éventuellement possible d'utiliser les événements en temps réel pour prévoir les risques potentiels sur d'autres stations.

Les variables utilisées dans cette étude sont les suivantes : le poids de l'accumulation mesuré au total et à chaque heure, la durée des accumulations, la température moyenne de l'accumulation et les paramètres de positionnement géographique des stations.

Comme nous l'avons vu dans l'introduction, les événements ont été redéfinis. Par cette restructuration de la base de données, les événements de givrage atmosphérique ont augmenté. Ceux-ci sont passés de 1703 événements à 6077 événements d'accumulation, soit une augmentation de 357%.

Nous constatons donc que dans beaucoup de cas, les événements enregistrés dans la base de données sont en fait une suite d'accumulations et de persistances.

3.2.1 Fréquences des événements

En général, le verglas est moins présent que le givre, il est donc normal d'avoir 38,85% d'événements de verglas et 61.15% d'événements de givre dans la base de données.

Les figures 3-7 et 3-8 donnent une représentation du nombre moyen d'événements de verglas et de givre respectivement, par année. La grosseur des points est proportionnelle au nombre moyen d'événements

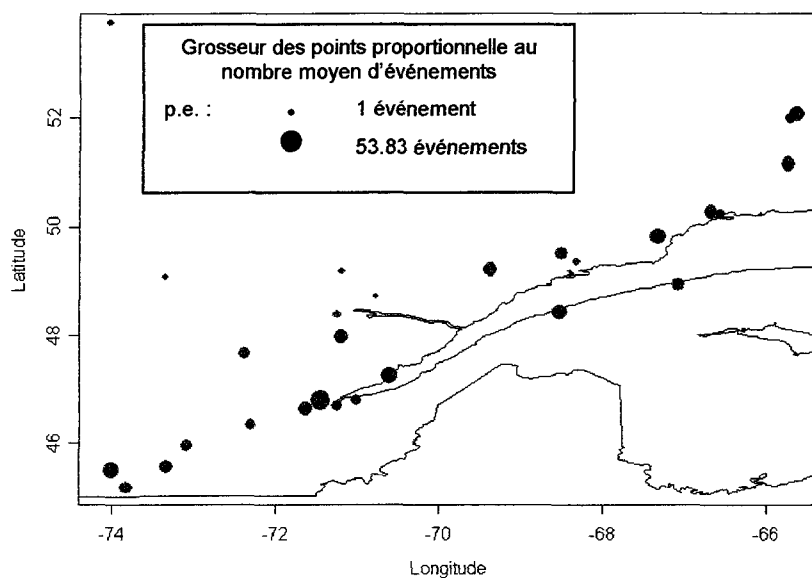


Figure 3-7 : Répartition des événements de verglas du réseau SYGIVRE

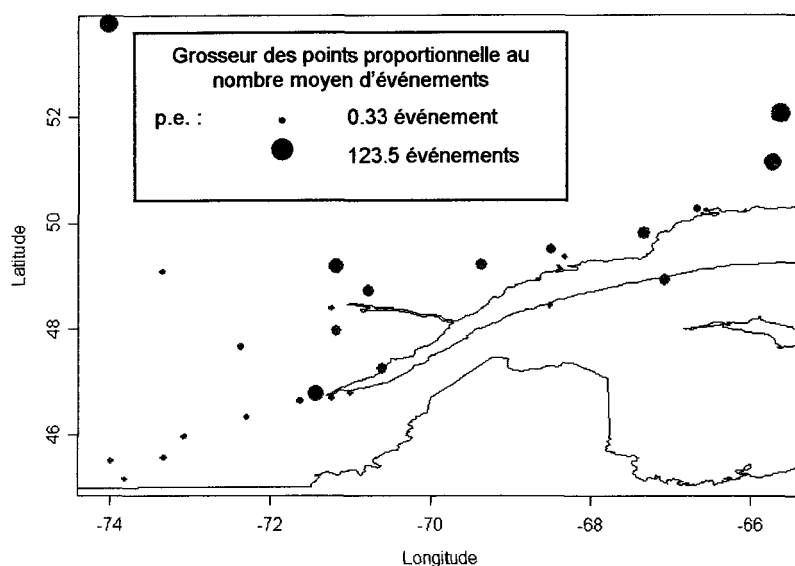


Figure 3-8 : Répartition des événements de givre du réseau SYGIVRE

En moyenne, nous avons 20.72 événements par station dans le cas d'accumulations de verglas et 32.6 événements dans le cas d'accumulations de givre.

La figure 3-9 donne une représentation par le Box Plot¹ de la distribution du nombre moyen d'événements pour le verglas et le givre.

¹ Le box Plot est un excellent outil pour communiquer la position et la variation d'informations de séries de données, particulièrement pour détecter et illustrer les changements de positions et de variations entre les différents groupes de données.

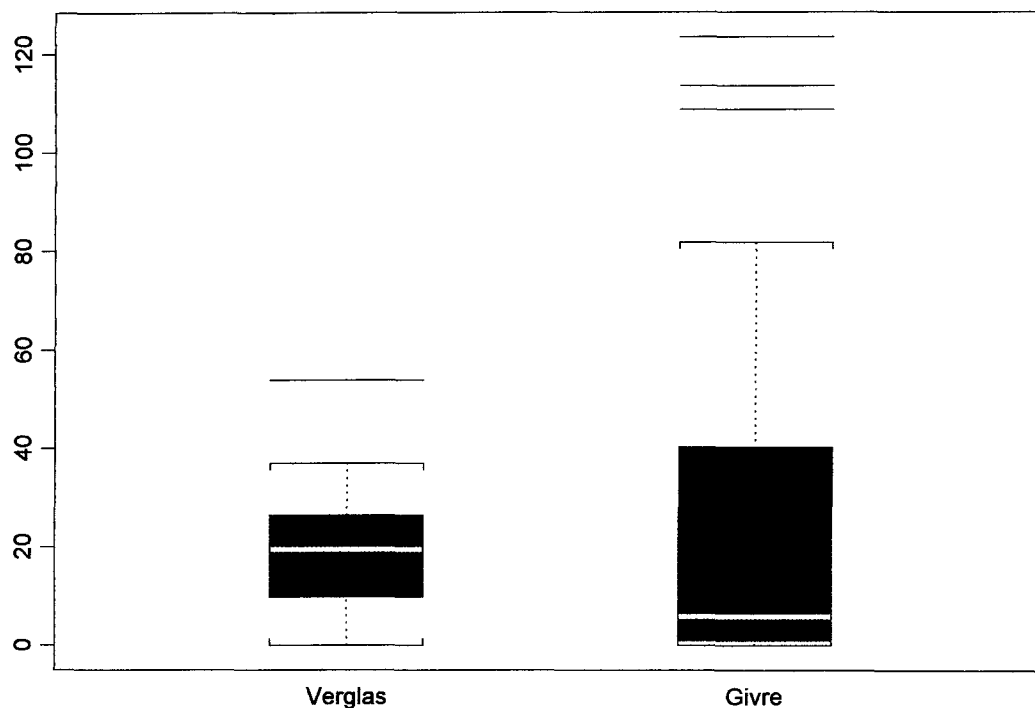


Figure 3-9 : Box-Plot sur le nombre d'événements moyen par année de verglas et de givre du réseau SYGIVRE

Certaines stations se retrouvent avec beaucoup d'événements. Pour ce qui est des événements de givre, ce sont les stations 8, 20, 21 et 26 et pour les événements de verglas c'est la station 8. Cette dernière comporte plus d'événements car c'est une station expérimentale placée dans un lieu propice au développement d'événements de givrage atmosphérique.

Les tableaux 3-9 et 3-10 donnent les principales statistiques pour le nombre d'événements par station.

Stations	Moyenne	Écart-Type	Maximum	Minimum	Médiane	Nb. Événements
1	37.00	NA	37.00	37.00	37.00	37
2	19.75	15.15	39.00	2.00	19.00	79
3	22.00	6.08	29.00	18.00	19.00	66
4	16.50	9.05	28.00	3.00	18.50	99
5	17.00	7.21	23.00	9.00	19.00	51
6	12.67	8.50	24.00	5.00	8.50	76
7	23.50	8.41	37.00	14.00	20.50	141
8	53.83	12.94	66.00	38.00	57.00	323
9	4.00	NA	4.00	4.00	4.00	4
10	12.67	8.04	25.00	3.00	13.00	76
11	10.83	8.64	24.00	2.00	10.00	65
12	35.67	19.60	54.00	0.00	39.00	214
13	22.50	14.04	38.00	0.00	23.50	135
14	19.17	14.47	37.00	0.00	20.00	115
15	29.00	NA	29.00	29.00	29.00	29
16	3.00	2.37	7.00	0.00	2.50	18
17	34.67	16.79	63.00	15.00	32.00	208
18	23.67	11.43	46.00	14.00	21.00	142
19	8.67	4.16	12.00	4.00	10.00	26
20	27.83	19.71	52.00	0.00	29.50	167
21	29.33	28.44	82.00	0.00	23.00	176
22	12.00	NA	12.00	12.00	12.00	12
23	25.00	NA	25.00	25.00	25.00	25
24	1.00	NA	1.00	1.00	1.00	1
25	20.67	11.85	28.00	7.00	27.00	62
26	1.50	2.12	3.00	0.00	1.50	3
27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
28	3.00	6.00	12.00	0.00	0.00	12
Base entière	20.72	17.28	82.00	0.00	18.50	

Table 3-9 : Principales statistiques pour le nombre d'événements de verglas par station pour le réseau SYGIVRE

Stations	Moyenne	Écart-Type	Maximum	Minimum	Médiane	Nb. Événements
1	2.00	NA	2.00	2.00	2.00	2.00
2	0.50	0.58	1.00	0.00	0.50	2.00
3	3.67	3.51	7.00	0.00	4.00	11.00
4	3.33	4.55	12.00	0.00	2.00	20.00
5	7.33	3.21	11.00	5.00	6.00	22.00
6	1.83	2.23	5.00	0.00	1.00	11.00
7	4.33	5.01	12.00	0.00	2.50	26.00
8	81.83	24.92	127.00	61.00	73.00	491.00
9	0.00	NA	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.33	0.82	2.00	0.00	0.00	2.00
11	0.67	1.03	2.00	0.00	0.00	4.00
12	36.17	11.41	52.00	26.00	31.50	217.00
13	40.33	17.14	66.00	21.00	39.00	242.00
14	31.17	24.56	80.00	14.00	23.00	187.00
15	0.00	NA	0.00	0.00	0.00	0.00
16	1.33	2.80	7.00	0.00	0.00	8.00
17	47.50	17.20	74.00	29.00	43.00	285.00
18	12.00	10.97	32.00	2.00	8.50	72.00
19	0.33	0.58	1.00	0.00	0.00	1.00
20	108.67	38.58	166.00	67.00	104.00	652.00
21	123.50	193.42	515.00	9.00	56.50	741.00
22	1.00	NA	1.00	1.00	1.00	1.00
23	33.00	NA	33.00	33.00	33.00	33.00
24	1.00	NA	1.00	1.00	1.00	1.00
25	29.33	14.50	44.00	15.00	29.00	88.00
26	113.50	12.02	122.00	105.00	113.50	227.00
27	40.00	33.94	64.00	16.00	40.00	80.00
28	72.50	34.78	110.00	32.00	74.00	290.00
Base entière	32.60	58.28	515.00	0.00	11.50	

Table 3-10 : Principales statistiques pour le nombre d'événements de givre par station du réseau SYGIVRE

Le nombre d'événements de givrage atmosphérique par station pour le réseau de PIM est représenté sur la figure 3-10.

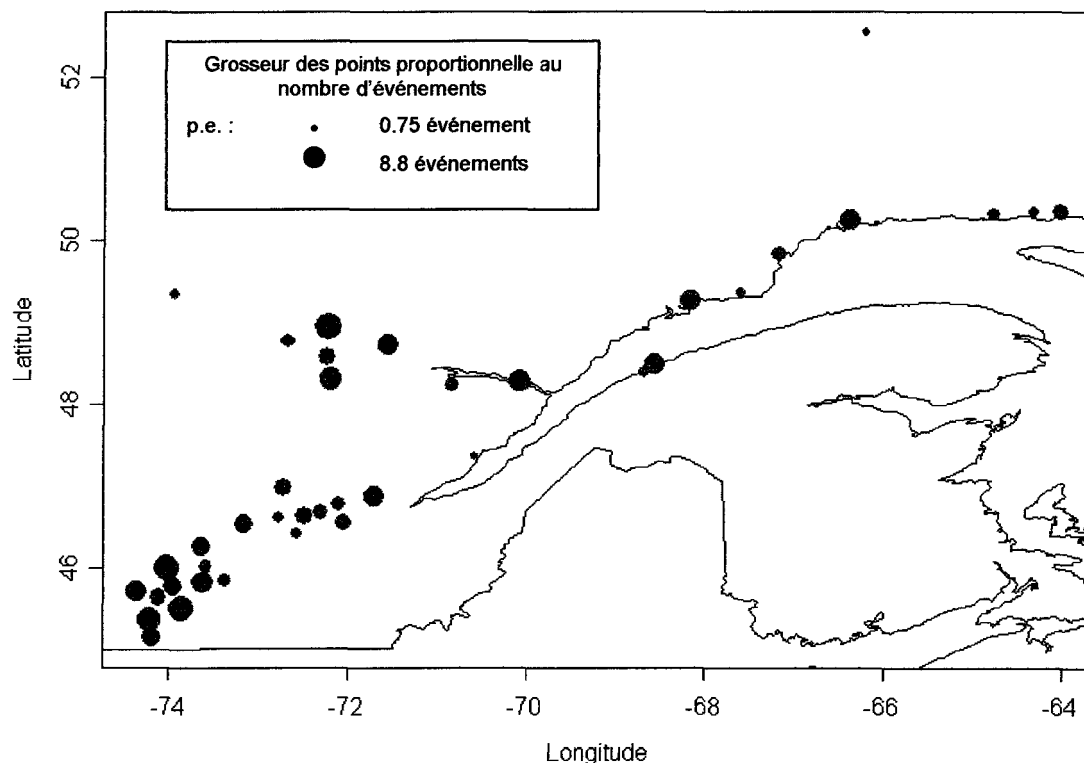


Figure 3-10 : Répartition du nombre d'événements pour le réseau de PIM

Le nombre moyen d'événements par station et par année est de 6.05 événements, son écart type de 3.59 avec comme valeurs extrêmes : 1 et 22.8.

Le nombre moyen d'événements par station et par année pour le réseau de PIM est donné par le Box Plot de la figure 3-11. Le nombre moyen d'événements par station est de 3.8 événements par année. Cette répartition est complètement différente de celle de la base de données SYGIVRE ce qui est dû principalement au fait que la précision est très petite (1 journée).

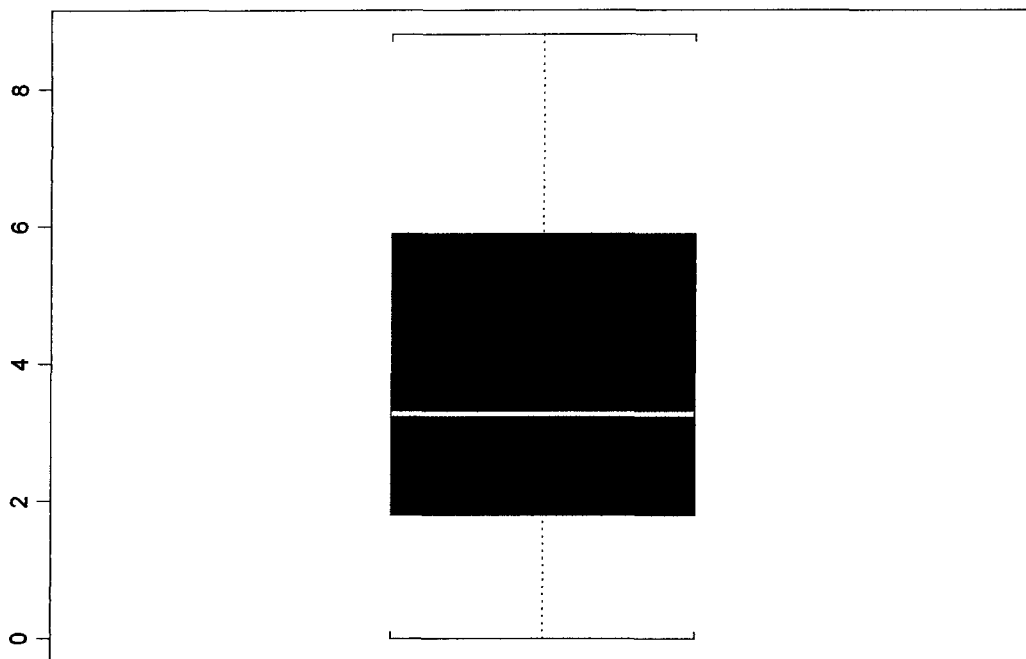


Figure 3-11 : Box-Plot sur le nombre d'événements moyen par station pour le réseau de PIM

En fait, il y a une répartition plus uniforme sur le territoire du nombre moyen d'événements pour le réseau de PIM. Cela est confirmé par l'écart type du nombre moyen qui est de 3 pour l'ensemble des stations du réseau de PIM (tableau 3-11) tandis qu'il est de 17 pour les événements de verglas et de 58 pour les événements de givre de la base de données SYGIVRE.

Le tableau 3-11 suivant nous donne les principales statistiques pour le nombre d'événements par station et par année.

Stations	Moyenne	Écart type	Maximum	Minimum	Nb. Événements
1	2.14	2.48	7.00	0.00	15
7	6.95	4.06	17.00	2.00	146
19	8.80	8.45	24.00	0.00	176
27	3.50	4.71	16.00	0.00	70
32	4.00	3.21	12.00	0.00	80
37	1.95	1.36	5.00	0.00	39
45	5.55	4.30	16.00	0.00	111
50	2.86	1.59	6.00	0.00	60
52	7.80	4.74	16.00	1.00	156
54	6.55	2.50	10.00	2.00	131
70	0.00	0.00	0.00	0.00	36
72	1.67	1.21	3.00	0.00	25
73	0.75	1.62	5.00	0.00	216
92	1.00	1.41	3.00	0.00	15
93	8.11	5.02	17.00	1.00	22
94	4.90	6.03	18.00	0.00	159
97	1.00	1.10	4.00	0.00	104
99	6.40	2.07	10.00	2.00	11
102	6.65	6.64	26.00	0.00	129
104	2.33	2.29	6.00	0.00	136
105	0.80	1.11	3.00	0.00	49
108	2.44	3.09	8.00	0.00	16
109	3.77	1.88	8.00	2.00	64
111	5.50	3.93	11.00	0.00	63
113	5.90	3.16	14.00	2.00	110
122	2.38	4.57	15.00	0.00	121
133	4.80	2.59	8.00	2.00	50
135	2.85	3.15	8.00	0.00	65
137	3.10	2.33	7.00	0.00	57
140	7.00	4.87	21.00	2.00	89
141	1.25	2.49	8.00	0.00	140
144	5.40	1.67	8.00	4.00	25
147	0.85	1.31	4.00	0.00	79
149	6.13	2.10	10.00	3.00	17
153	2.05	1.99	6.00	0.00	122
154	4.67	4.20	12.00	0.00	44
159	1.29	1.74	6.00	0.00	98
164	3.27	3.82	10.00	0.00	27
169	1.80	3.53	11.00	0.00	60
	3.798779	3.032759	10.23077	0.589744	

Table 3-11 : Principales statistiques pour le nombre d'événements par station et par année pour le réseau de PIM

Contrairement à la base de données SYGIVRE, il y a en moyenne peu d'événements par station. La précision n'est pas en cause car, en moyenne, la durée des événements de la base de données SYGIVRE est de 2.61 heures et celle des événements de la base de données sur les PIM, d'une journée, ce qui veut dire qu'il faudrait en moyenne 9 événements par jour dans la base de données SYGIVRE pour que la précision de la base de données sur les PIM soit en cause, ce qui n'est pas le cas.

D'autre part, les stations les plus sollicitées sont situées dans la région de Montréal.

3.2.2 Durée des événements

Les événements ont des durées différentes suivant que nous avons une accumulation de type givre ou de type verglas. En effet, les épisodes de verglas sont connus pour être moins longs que les épisodes de givre.

Les deux cartes des figures 3-12 et 3-13, respectivement pour les événements de verglas et ceux de givre, montrent que les durées des événements suivant les données de SYGIVRE sont presque identiques pour le givre et pour le verglas à chaque station.

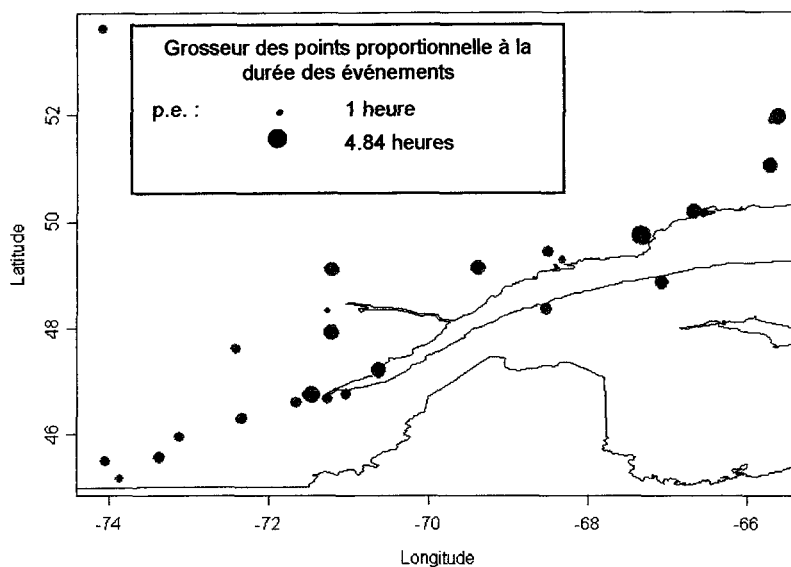


Figure 3-12 : Répartition de la durée des événements de verglas du réseau SYGIVRE

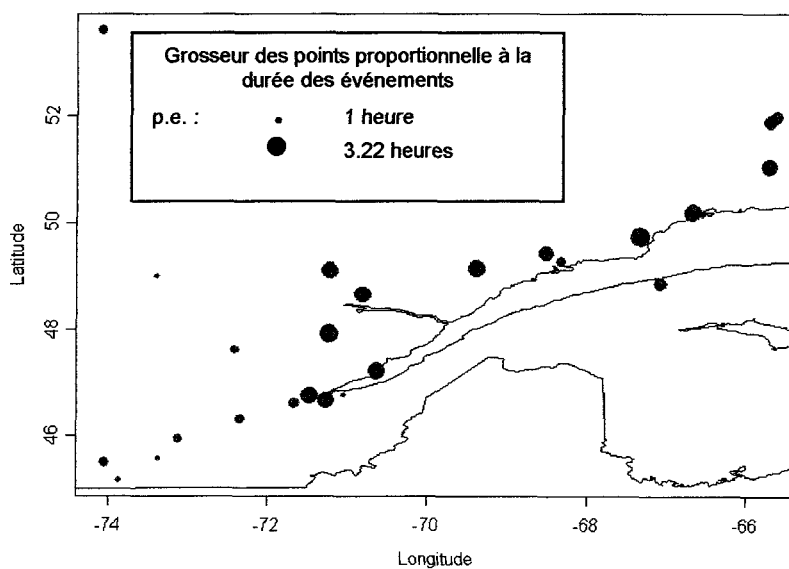


Figure 3-13 : Répartition de la durée des événements de givre du réseau SYGIVRE

Mais, en regardant plus précisément, nous nous apercevons que la durée moyenne des événements de givre est de 2,36 heures et celle des événements de verglas de 3,01 heures. Cela se traduit par une plus longue période d'accumulation, lors de précipitations givrantes, pour les événements de type verglas. L'écart type associé aux événements de verglas est de 3.51 heures et celui des événements de givre de 3.01 heures. Il est intéressant de noter que la médiane des événements de verglas est 2 et celle des événements de givre 1. En effet, 63% des événements de givre durent 1 heure et seulement 46% pour ceux de verglas. D'autre part, les événements ont une durée moins longue pour les stations situées dans la région de Montréal que celles des autres régions.

Les histogrammes présentés sur la figure 3-14 donnent la répartition des durées pour les événements de verglas et de givre. Les deux distributions sont assez semblables mais le nombre d'événements est beaucoup plus important pour le givre.

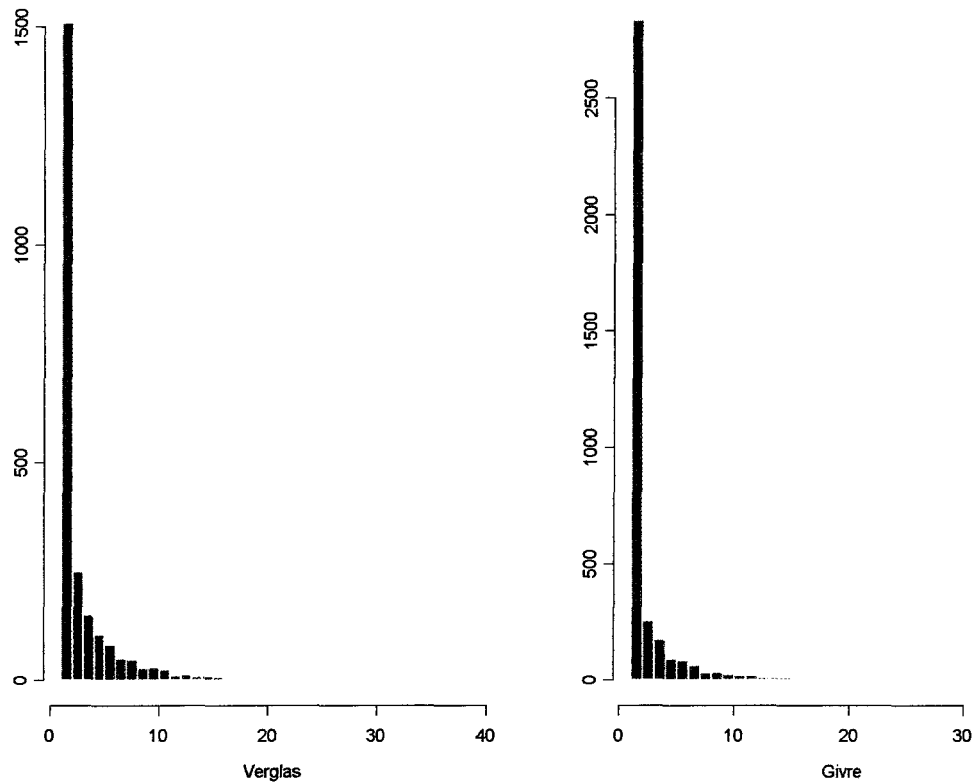


Figure 3-14 : Histogramme des durées des événements pour le réseau SYGIVRE

Pour comparaison, nous pouvons regarder la durée des événements de la base de données sur les PIM. La durée des événements est difficilement identifiable à cause de la précision des mesures. En effet, nous avons une précision d'une journée. Or, les événements peuvent durer de quelques heures à plusieurs jours. Dans notre cas, les événements durent au moins 1 journée (c'est la précision des données qui nous l'impose) et jusqu'à 6 jours. La moyenne est de

1.07 jour. Cela nous indique que la grande majorité des événements durent moins d'une journée.

La carte de la figure 3-15 montre les durées moyennes des événements pour les stations du réseau de PIM.

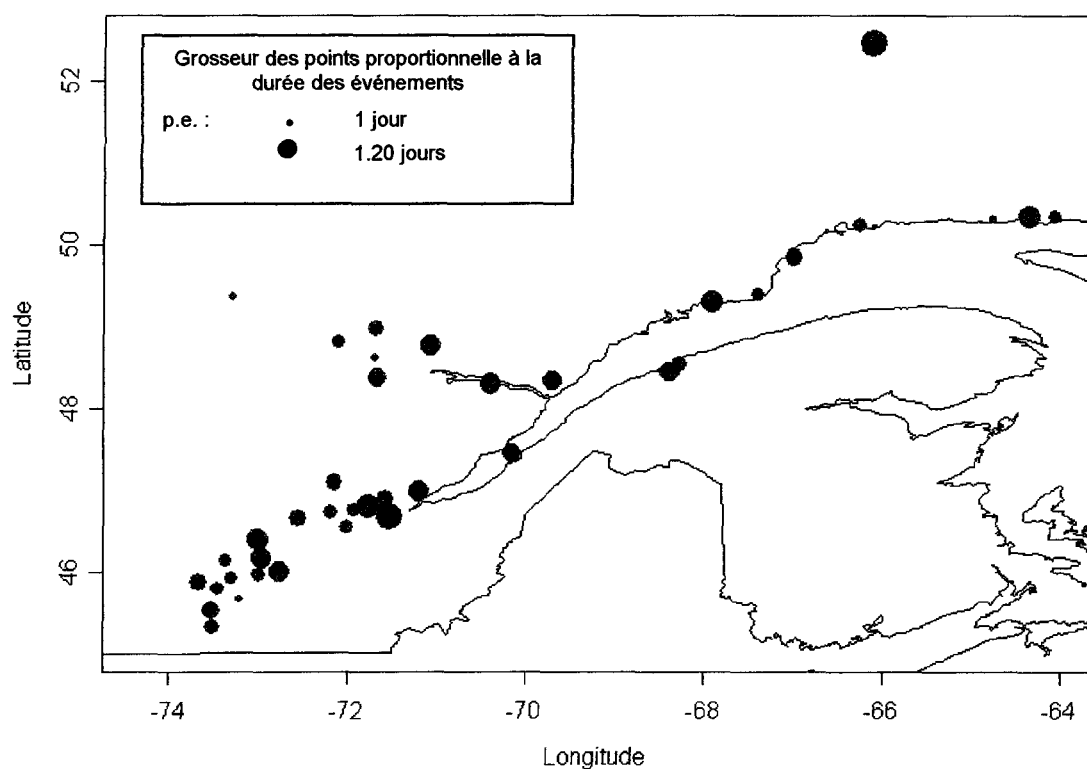


Figure 3-15 : Carte des durées des événements pour les stations du réseau de PIM

Toutes les stations ont une durée moyenne par événement assez semblable avec tout de même quelques nuances, notamment dans la région de Montréal, comme pour la base de données SYGIVRE. Dans cette région, les événements

ont une durée moyenne moins grande, ce qui confirme les résultats de la base de données SYGIVRE.

3.3 Saisons de givrage atmosphérique

Le climat admet des variations évidentes au niveau des jours, mais aussi au niveau des années. Des phénomènes comme « El Niño » ont une influence sur plusieurs années. Il serait donc utile de grouper les années semblables pour les analyser ensemble.

Le problème est de grouper les années qui se ressemblent. Suivant le type d'étude, différents paramètres peuvent être utilisés. Pour celle présentée dans ce mémoire, seuls les paramètres concernant les événements ont été utilisés, les autres paramètres comme la température, l'humidité, les précipitations au sol, etc. n'ont pas été étudiés. Cela s'explique par le fait que nous ne voulons pas caractériser les saisons en fonction de la température moyenne ou d'autres paramètres si ceux-ci n'ont pas d'influence sur la présence d'événements de givrage atmosphérique.

Deux classifications sont étudiées. La première est faite en fonction de la proportion des événements dans chaque saison de givrage atmosphérique et la seconde en fonction de la répartition des événements au cours d'une saison.

3.3.1 Répartition des événements

Les événements de givre ou de verglas ne sont pas répartis uniformément dans la saison, certaines périodes sont plus propices que d'autres au développement de ces phénomènes atmosphériques. Ces périodes plus à risque dépendent de l'année d'observations. Pour analyser ces périodes, on considère un processus de Poisson non-homogène [54] sur la saison (allant du 1 juillet au 30 juin de l'année suivante), pour modéliser l'apparition d'un événement.

La fonction d'intensité du processus notée $\lambda(t)$ est telle que, le nombre moyen d'événements dans un intervalle $[t_1, t_2]$ est donné par :

$$\mu(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \quad \text{Eq. 3-2}$$

Posons X la variable aléatoire qui donne la période d'un événement dans la saison étant donné que l'événement se produit. La fonction de densité de la variable aléatoire X représente la répartition des événements sur la saison et elle est liée à l'intensité par la relation :

$$f_X(t) = \frac{\lambda(t)}{\int \lambda(x) dx} \quad \text{Eq. 3-3}$$

La répartition des événements est obtenue directement de l'intensité, or, un estimateur non paramétrique de la répartition s'obtient en considérant la méthode du noyau [51]

$$\hat{f}_X(t) = \frac{1}{n.h} \sum_{i=1}^n w\left(\frac{t-t_i}{h}\right) \quad \text{Eq. 3-4}$$

où t_1, \dots, t_n sont les dates des n événements. Le noyau w a peu d'influence sur le comportement de l'estimateur et le noyau normal

$$w(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad \text{Eq. 3-5}$$

donne des résultats satisfaisants dans la majorité des cas [51]. Le paramètre de lissage h est celui qui a le plus d'influence sur la qualité de l'estimateur [51]. On considère le paramètre proposé par

$$h = 0.9 A n^{-1.5} \quad \text{Eq. 3-6}$$

avec $A = \min(\text{écart type}, \text{écart interquartile}/1.34)$ et l'écart interquartile vaut $Q_{75} - Q_{25}$. Si h est faible, $f(x)$ sera très peu régulière, si h est grand, $f(x)$ sera très (trop) lisse. La valeur du paramètre donnée par l'équation 3-6 est bien adaptée aux données disponibles.

Les courbes des figures 3-16 et 3-17 nous montrent les répartitions des événements au cours d'une saison de givrage pour des événements de verglas et de givre.

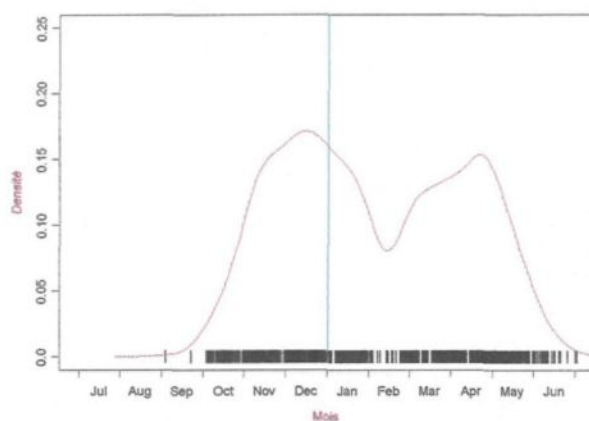


Figure 3-16 : Densité des événements de verglas au cours de la saison de givrage pour le réseau SYGIVRE

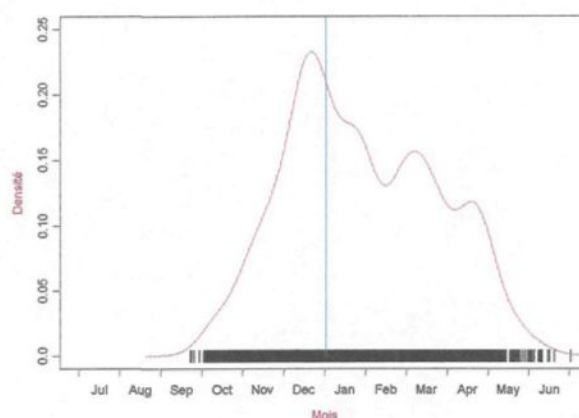
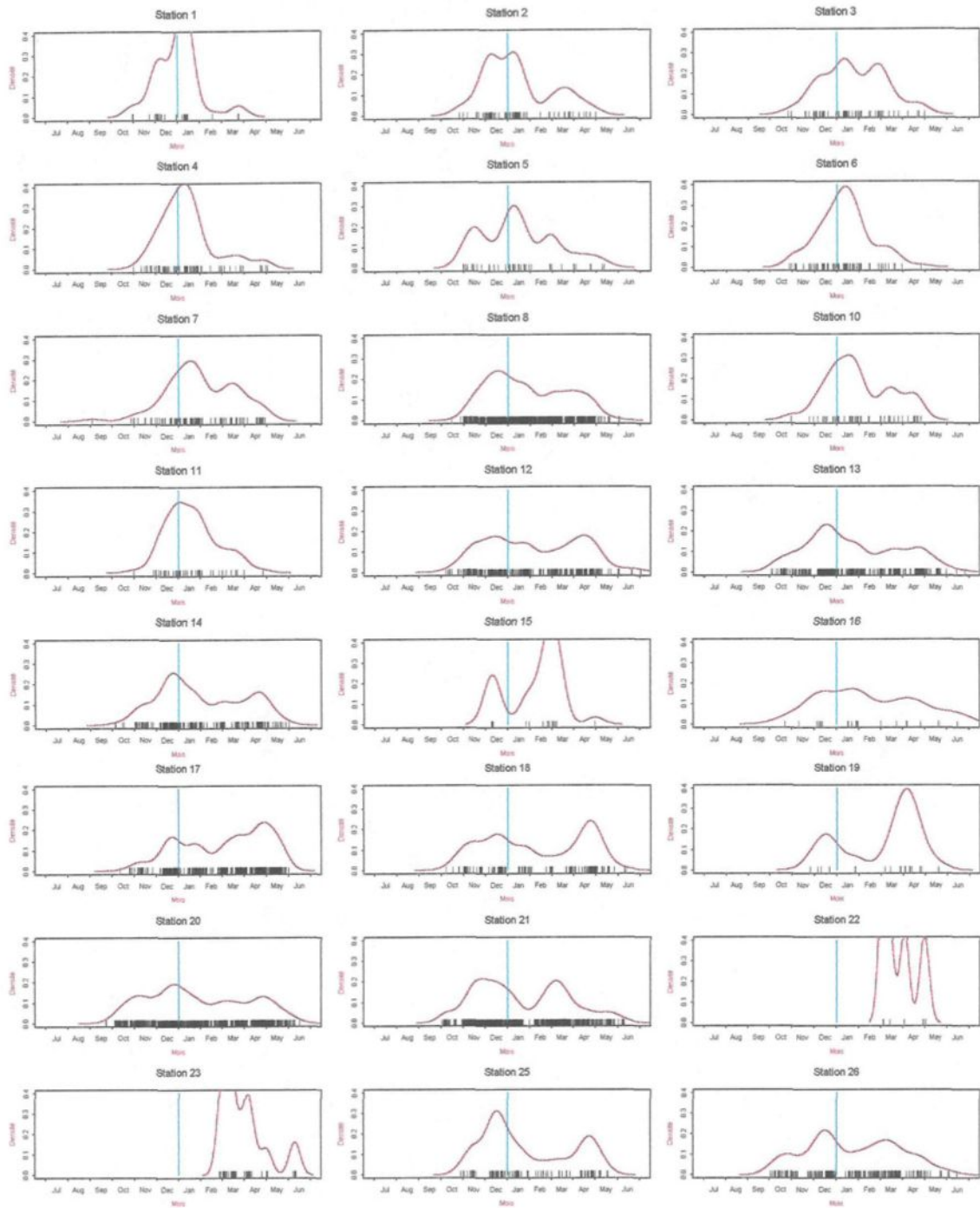


Figure 3-17 : Densité des événements de givre au cours de la saison de givrage pour le réseau SYGIVRE

Ces courbes sont construites pour tous les événements de verglas et de givre. Cela nous permet de nous donner une représentation de la distribution des événements dans la saison de givrage atmosphérique.

Il est intéressant de noter que les répartitions sont sensiblement différentes (figures 3-16 et 3-17). La courbe de répartition des événements de verglas présente deux périodes d'accumulations de même intensité. La première se situe dans le début de l'hiver et la deuxième vers la fin de l'hiver. Entre ces deux périodes, nettement moins d'événements sont présents. La courbe de répartition des événements de givre présente une grande période d'accumulation en début d'hiver et par la suite, deux périodes de moins grande intensité apparaissent.



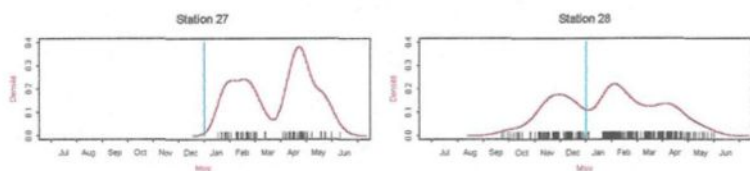


Figure 3-18 : Répartition des événements par station pour la base SYGIVRE

Cette représentation par la fonction d'intensité des événements de givrage atmosphérique permet donc de faire une caractérisation des stations ou régions à dominance de verglas ou à dominance de givre. La figure 3-18 donne la densité des événements pour chaque station du réseau SYGIVRE. Les stations 13, 14 et 26 ont des répartitions identiques. La probabilité d'apparition des événements est forte en début de saison mais aussi en fin de saison dans une moindre mesure. Ces trois stations sont des stations à dominance d'événements de givre. Les stations 4, 6 et 11 toutes à dominance d'événements de verglas ont elles aussi une répartition des événements sensiblement identique. Elles ont une forte probabilité d'apparition d'événements de givrage atmosphérique en début de saison. La densité des événements pour les stations 9 et 24 ne peut être représentée à cause d'un trop petit nombre de données.

En ce qui concerne la base de données sur les PIM, nous regardons la répartition globale des événements de givrage atmosphérique. La représentation est donnée sur la figure 3-19.

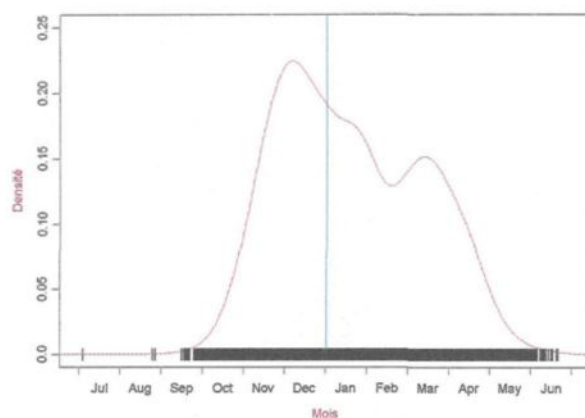
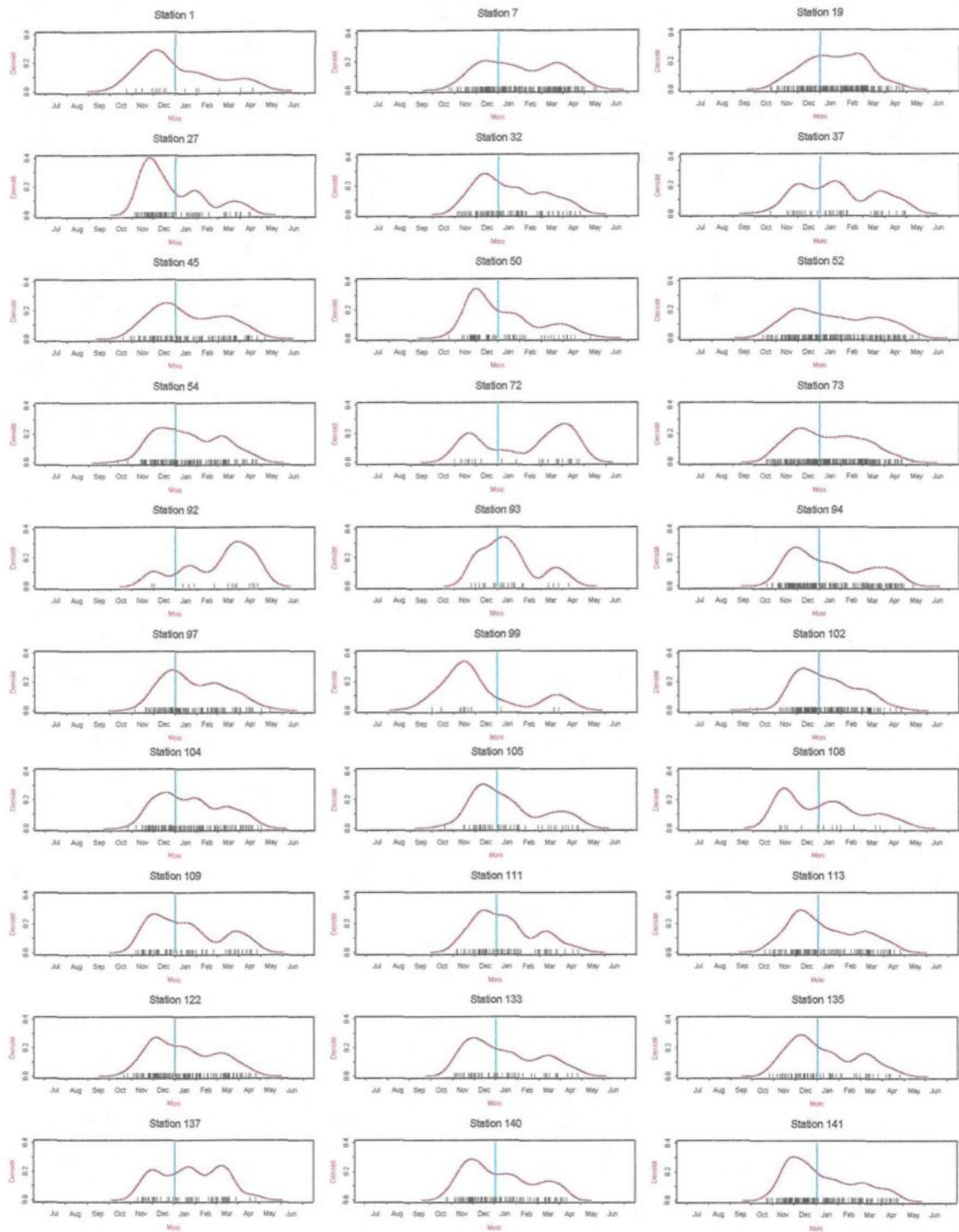


Figure 3-19 : Densité des événements au cours de la saison pour le réseau de PIM

Nous nous apercevons que la courbe comporte sensiblement les mêmes caractéristiques que pour les événements de givrage atmosphérique de la base de données SYGIVRE. Cela voudrait donc dire que la forme générale de la répartition des événements au cours d'une saison de givrage atmosphérique est celle présente sur ces représentations. La figure 3-20 nous indique la représentation des événements répartis par stations de la base de données sur les PIM.



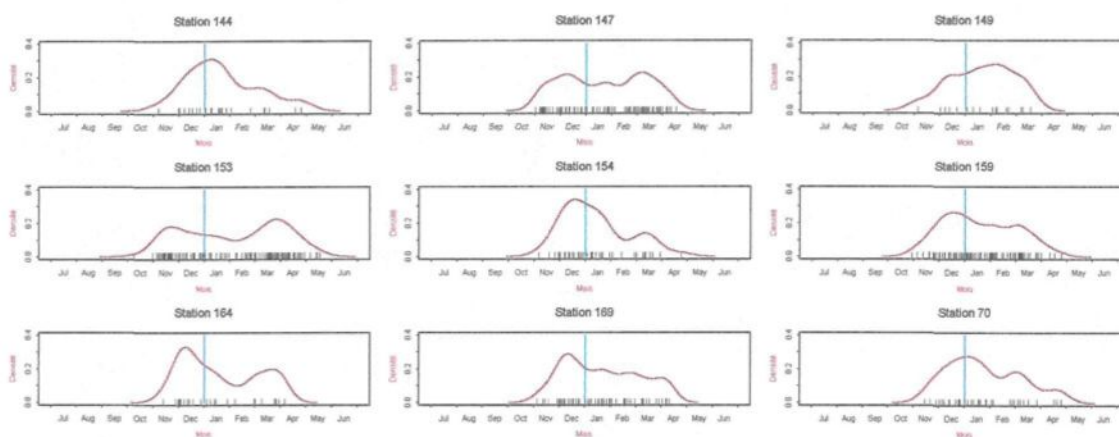


Figure 3-20 : Répartition des événements par station pour la base de données sur les PIM

Comme pour les stations SYGIVRE, certaines stations ont des répartitions très semblables. Par exemple, les stations 109, 111, 113, 122, 133, 135, 140 et 141 ont toutes une forte probabilité d'apparition en début de saison puis moindre par la suite. Toutes ces stations sont placées à coté de stations à dominance d'événements de verglas dans la base de données SYGIVRE. Donc, étant donné que ces stations sont proches géographiquement, le fait d'obtenir des intensités semblables, c'est le signe que l'intensité est une caractéristique géographique et une caractéristique du type de précipitation.

3.3.2 Classification

La représentation et l'analyse des années sont essentielles. Cela nous permettra par la suite de savoir si les données de certaines saisons peuvent être regroupées afin de faire les études sur les stations.

Dans le but d'établir des ressemblances et des différences entre les années, nous nous intéressons essentiellement à la répartition des événements en terme de fréquence et de densité sur la période. Dans un premier temps, nous décrivons les saisons en termes d'intensité pour permettre une comparaison visuelle pour ensuite établir des groupements par une classification hiérarchique.

3.3.2.1 Saisons

La figure 3-21 donne les répartitions pour les 6 saisons du réseau SYGIVRE depuis son ouverture en 1992.

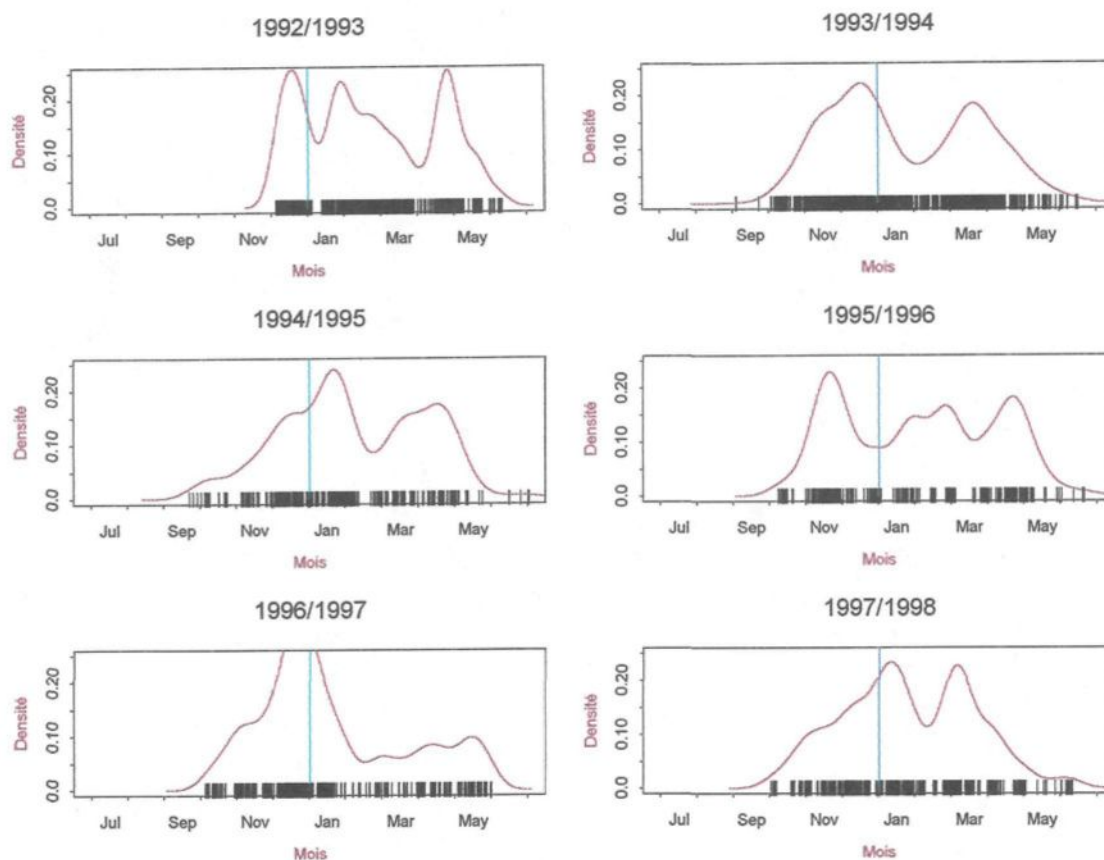


Figure 3-21 : Densités des événements par saison pour le réseau SYGIVRE

Les courbes pour chaque saison de givrage atmosphérique sont différentes, ce qui reflète bien le fait que chaque hiver est différent. Nous remarquons par exemple que les saisons 1994/1995 et 1997/1998 sont très semblables et que la saison 1996/1997 est très différentes de la saison 1997/1998.

De la même manière que pour la base de données SYGIVRE, nous pouvons caractériser les saisons par la fonction d'intensité. Dans la base de données sur

les PIM, nous sommes en présence de 21 saisons d'observations. Celles-ci sont représentées sur la figure 3-22.

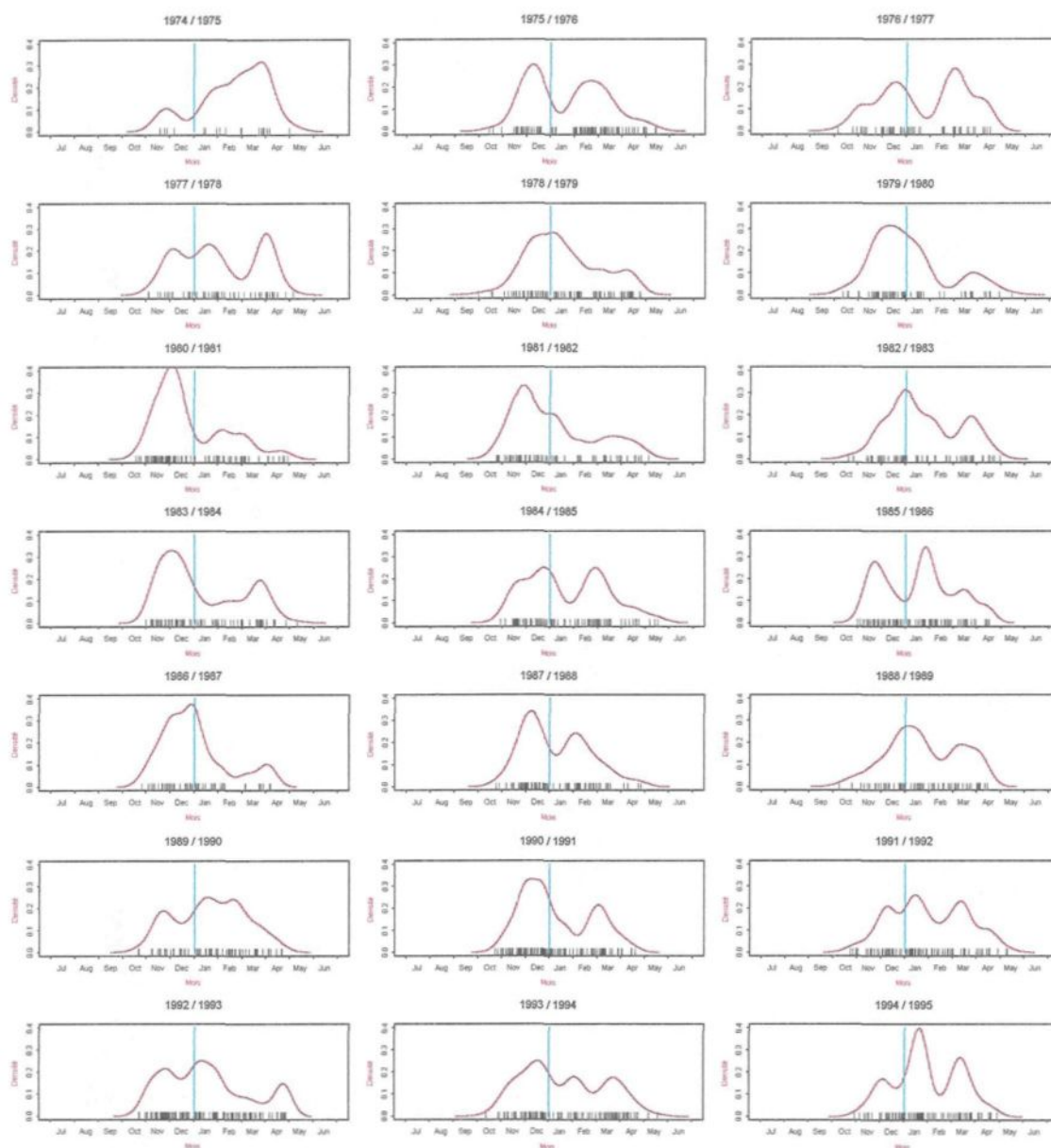


Figure 3-22 : Densités des événements par saison pour le réseau de PIM

Comme pour la base de données SYGIVRE, certaines saisons se ressemblent comme les saisons 1977/1978 et 1984/1985 ou 1979/1980 et 1986/1987 tandis que d'autres sont complètement différentes, comme par exemple les saisons 1980/1981 et 1994/1995.

On remarque d'ailleurs que les saisons 1992/1993, 1993/1994 et 1994/1995 analysées à l'aide des données de SYGIVRE et des données sur les PIM ont une répartition assez semblable bien que les moyennes d'événements soient assez différentes. (section 3.2.1)

Visuellement, nous pouvons donc déterminer des saisons qui sont proches car les courbes sont semblables, mais nous ne pouvons pas dire entre trois saisons relativement identiques quelles sont les deux qui se ressemblent le plus. Là encore nous avons besoin d'un outil moins arbitraire pour nous aider à faire la classification. Ceci se fait par l'utilisation de la distance entre les saisons de givrage atmosphérique qui permet de donner un indice de similarité.

3.3.2.2 Distances

Deux types de distances ont été étudiées car celles-ci présentaient des caractéristiques différentes et ne faisaient pas apparaître les mêmes intérêts. La première distance se base sur la fonction d'intensité et fait apparaître des ressemblances et différences au niveau de la saison. Celle-ci se base sur la répartition temporelle des événements. La seconde distance fait intervenir le nombre d'événements par saison. Elle se base sur la sévérité de celle-ci.

3.3.2.2.1 Distance basée sur la fonction d'intensité

La fonction d'intensité appliquée aux saisons de givrage atmosphérique nous donne une représentation de la probabilité qu'une accumulation se produise un jour donné. Mais les comparaisons entre ces saisons sont difficilement réalisables visuellement. Nous allons donc définir une distance entre les saisons.

Une distance naturelle est donnée par la norme L_1 [5]. La définition est définie par la formule suivante :

$$d_{i,j} = \int |f_i(x) - f_j(x)| dx \quad \text{Eq. 3-7}$$

où f_i et f_j sont les répartitions des événements de givrage atmosphérique pour les saisons i et j , respectivement, et $d_{i,j}$ est la distance entre les saisons i et j .

En appliquant cette formule à toutes les saisons, nous obtenons une matrice de distance. Cette distance varie entre 0 et 2. Pour des répartitions complètement différentes, la distance sera de 2, dans le cas contraire, pour des répartitions identiques, la distance sera égale à 0.

Sur la figure 3-23, nous avons un exemple d'une distance égale à 2.

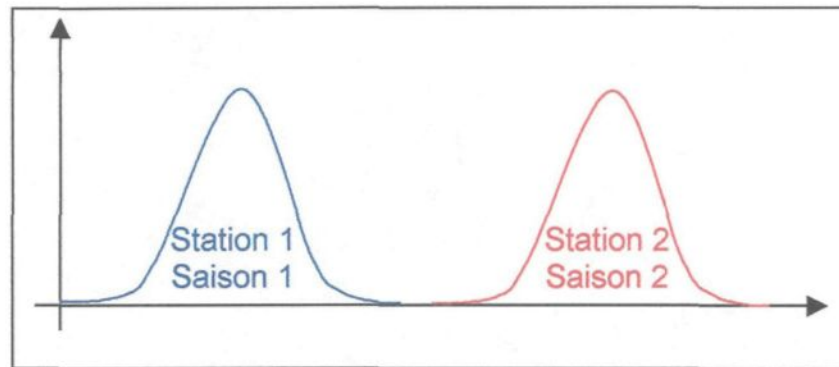


Figure 3-23 : Représentation de deux densités

3.3.2.2.2 Distance basée sur la fréquence

Une autre distance est obtenue en considérant la fréquence des événements par station de givrage atmosphérique sur toutes les saisons de givrage.

Nous pouvons ainsi comparer les saisons entre elles et savoir si celles-ci comportent plus ou moins d'événements. Nous avons alors une comparaison entre les saisons en termes du nombre d'événements de givrage atmosphérique

Considérons deux saisons i et j et posons n_{ik} et n_{jk} le nombre d'événements aux saisons i et j respectivement, à la station k . La distance se mesure en termes d'indépendance entre les fréquences des deux saisons. On obtient un tableau de dimension $2 \times m$ où m est le nombre de stations. Pour établir la distance avec la statistique du khi-deux, on utilise le niveau de signification du test d'indépendance associé. Ce niveau est la probabilité d'observer la valeur de la statistique ou plus grand sous l'hypothèse nulle (H_0). La formule générale du test est la suivante [38] :

$$\chi^2 = \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^m \frac{\left(n_{lk} - \frac{n_{.k} n_{l.}}{n} \right)^2}{\frac{n_{.k} n_{l.}}{n}} \quad \text{Eq. 3-8}$$

où n est le nombre d'événements pour les deux saisons.

La distance est donnée par le niveau de signification du test d'indépendance : si $\hat{\alpha}$ est le niveau de signification, la distance qui sépare les saisons est une valeur entre 0 et 1. Si les saisons sont semblables, elles sont dépendantes et $\hat{\alpha}$ est petit, proche de 0, si au contraire, elles sont indépendantes, $\hat{\alpha}$ est près de 1.

3.3.2.3 Regroupements des saisons

Le groupement des saisons se fait par la classification hiérarchique [37] en utilisant la méthode du plus proche voisin pour effectuer les groupements.

L'algorithme de cette méthode est seulement basé sur les dissimilitudes. C'est pourquoi il est essentiel d'avoir construit la matrice de distance (ou dissimilitudes) au préalable. Cela nous laisse le choix de la méthode de construction de cette matrice.

Initialement, chaque objet est considéré comme un groupe séparé. Le reste du calcul consiste, par itération, aux étapes suivantes :

- rassembler les deux groupes avec la plus petite dissimilitude entre les groupes ;
- calculer la dissimilitude entre le nouveau groupe et tous les autres groupes.
- recalculer la dissimilitude du nouveau groupe par :

$$d_{R,Q} = \min_{i \in R, j \in Q} d_{i,j} \quad \text{Eq. 3-9}$$

R et Q sont les groupes de saisons.

3.3.2.3.1 Base de données SYGIVRE

Avec la distance définie à partir des intensités, nous avons la classification hiérarchique montrée sur la figure 3-24 tandis que la figure 3-25 donne la classification hiérarchique à partir de la fréquence des événements.

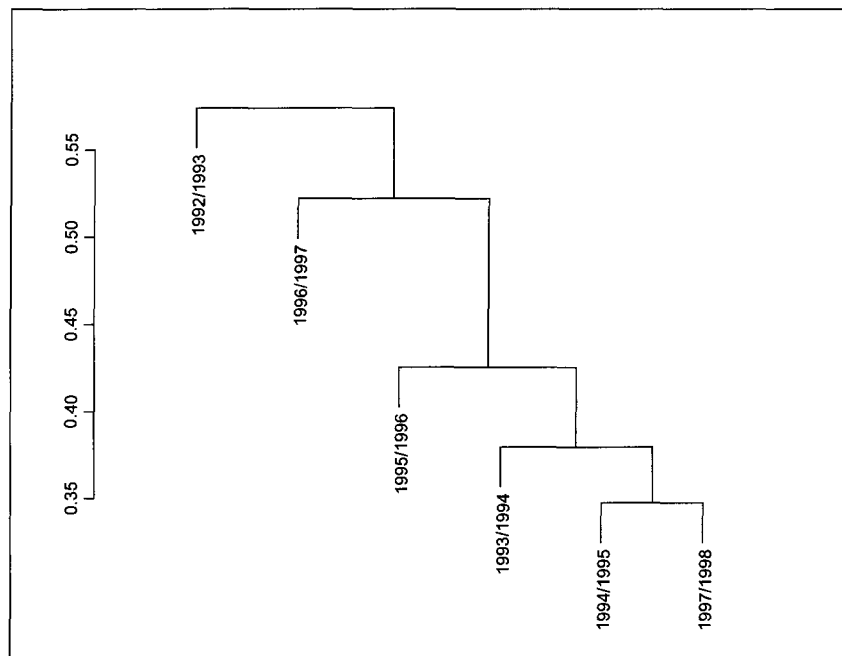


Figure 3-24 : Regroupement des années à partir des intensités pour le réseau SYGIVRE

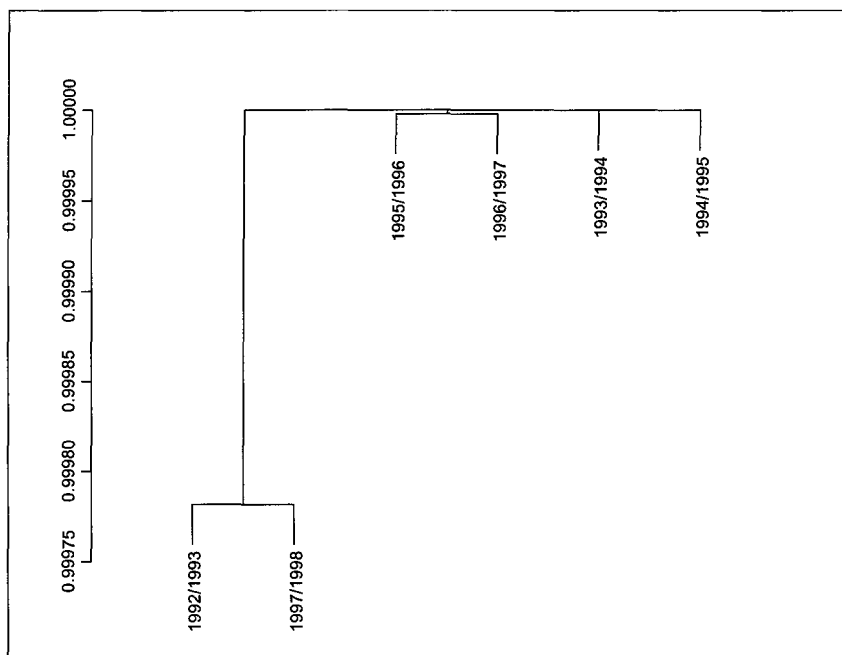


Figure 3-25 : Regroupement des années à partir de la proportion d'événements pour le réseau SYGIVRE

Contrairement à la précédente classification, les saisons de givrage atmosphérique sont difficilement regroupées en termes de similitude. La proportion d'événements indique donc que chaque année est différente. L'intensité, quand à elle, propose certaines similitudes entre ces années.

3.3.2.3.2 Base de données sur les PIM

Avec la distance définie à partir des intensités, nous avons la classification hiérarchique montrée sur la figure 3-26 tandis que la classification hiérarchique à partir de la fréquence des événements est donnée sur la figure 3-27.

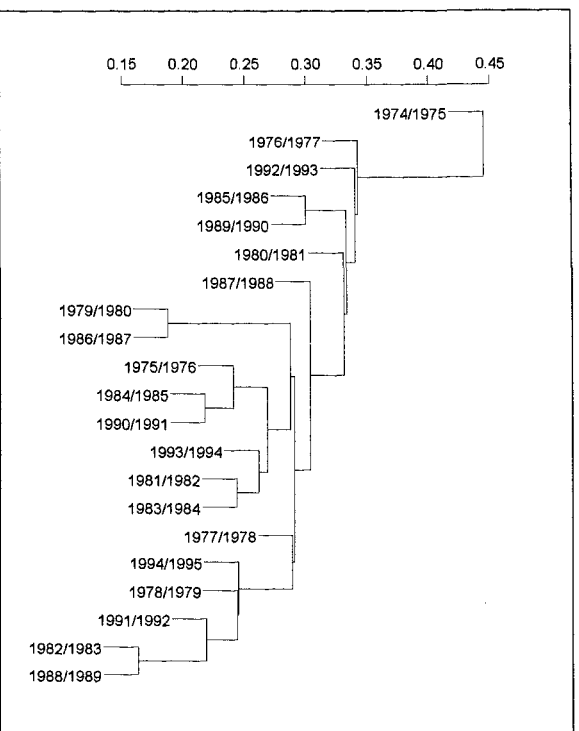


Figure 3-26 : Regroupement des années à partir des intensités pour le réseau de PIM

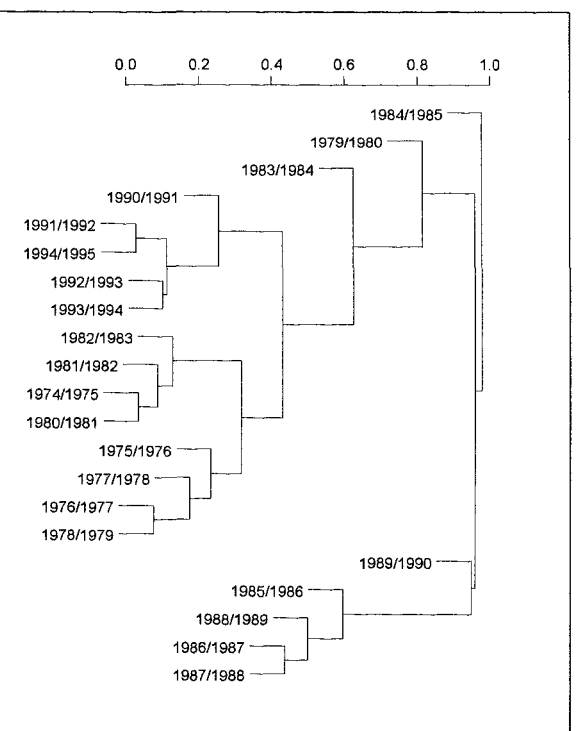


Figure 3-27 : Regroupement des années à partir de la proportion d'événements pour le réseau de PIM

Ces deux représentations présentent des caractéristiques différentes, et les groupements des saisons en sont affectés.

3.3.2.4 Interprétation des classifications

Les classifications hiérarchiques que nous obtenons par la méthode et les distances énoncées ci-dessus sont très différentes. Ceci est dû au fait que les deux classifications expliquent des aspects différents. La classification à partir de la répartition des événements dans la saison de givrage atmosphérique considère l'aspect temporel des événements de givrage par la répartition de ceux-ci au cours de l'année. L'aspect spatial n'est pas pris en compte. En effet, étant donné que toutes les stations sont regroupées ensemble pour rassembler les événements, il n'y a plus de distinction spatiale. Or, nous sommes en présence d'une grande région où les conditions climatologiques sont différentes d'un endroit à un autre.

La classification à partir de la proportion d'événements permet de faire des distinctions de saisons de givrage atmosphérique en tenant compte de chaque station et donc d'intégrer l'aspect spatial sur les données. Malheureusement, nous ne pouvons pas considérer l'aspect temporel des données dans une saison de givrage atmosphérique. En effet, nous ne connaissons que la proportion des périodes d'accumulation d'une saison par rapport à une autre saison et non leur répartition.

3.3.2.5 Interprétation des résultats

Les classifications hiérarchiques pour la base de données SYGIVRE ne peuvent donner de résultats significatifs à l'heure actuelle. En effet, il y a un

manque de stations et de saisons. Les résultats fournis sont donc provisoires et devront être repris dans les années à venir.

Les deux classifications sont différentes. Pour ce qui est de la classification par les intensités, celle-ci regroupe des saisons avec de relativement grandes probabilités. Par contre, en ce qui concerne la classification par la proportion, les saisons sont très mal regroupées en termes de probabilité.

Les classifications hiérarchiques pour la base de données sur les PIM sont plus intéressantes car le nombre de saisons d'observations ainsi que le nombre de stations retenues pour l'étude sont plus nombreux.

La classification par les intensités fait apparaître deux grands groupes de saisons. Le premier est composé des saisons 1977/1978, 1978/1979, 1982/1983, 1988/1989, 1991/1992 et 1994/1995. Ce groupe a la particularité d'avoir une grande probabilité d'apparition d'événements vers la fin décembre / début janvier et une autre moins forte en fin de saison, vers mars / avril. Le deuxième groupe est composé des saisons 1975/1976, 1979/1980, 1981/1982, 1983/1984, 1984/1985, 1986/1987, 1990/1991 et 1993/1994. La particularité de ce groupe est que chaque saison a une probabilité d'apparition d'événements forte en début de saison, fin novembre / début décembre et une autre moins prononcée en mars. Le reste des saisons présente des caractéristiques différentes, c'est pour cela qu'elles se regroupent au fur et à mesure de leur ressemblance entre-elles.

La classification des saisons par la proportion d'événements fait apparaître quatre groupes de saisons. Le premier groupe est composé des saisons

1985/1986, 1986/1987, 1987/1988, 1988/1989 et 1989/1990, le deuxième des saisons 1975/1976, 1976/1977, 1977/1978 et 1978/1979, le troisième des saisons 1974/1975, 1980/1981, 1981/1982 et 1982/1983, et le quatrième des saisons 1990/1991, 1991/1992, 1992/1993, 1993/1994 et 1994/1995. Il est à noter que les groupements présentent une caractéristique particulière. En effet, chaque groupement possède des saisons qui se suivent dans le temps, à l'exception de la saison 1974/1975.

3.4 Conclusions

L'analyse des différents paramètres décrivant les événements ont pu fournir les conclusions suivantes.

Les événements de givrage atmosphérique de type givre sont plus nombreux que ceux de type verglas. Les paramètres des événements de givre ont de plus grandes étendues que ceux des événements de verglas. Cela se traduit par de plus grandes gammes de données concernant la durée, la température et le poids des événements de givre. Cette caractéristique influence les regroupements des saisons mais aussi des stations à cause d'un manque d'années d'observations et donc d'une bonne représentation de l'ensemble de ces combinaisons entre les paramètres. La durée des événements n'est pas identique selon que nous sommes en présence d'un événement de type givre ou de type verglas. Dans le second cas, la durée est plus longue. La température des événements est un bon indicateur en ce qui concerne le type de l'accumulation. Ces plages sont

conformes, en moyenne, à la théorie. Finalement, nous avons vu que la fréquence des événements était répartie plutôt uniformément le long de la vallée du St. Laurent pour les événements de type verglas et à partir de Québec le long de la vallée du St. Laurent pour les événements de type givre.

L'analyse de la base de données sur les PIM permet de voir que les événements sont en moyenne de moins en moins importants. D'autre part, nous avons vu que certaines différences importantes existaient entre les saisons communes des deux bases de données. Malheureusement, par un manque de précision assez important et un manque de paramètres disponibles pour la base de données sur les PIM, nous ne pouvons expliquer ces différences.

Les caractérisations des saisons de givrage atmosphérique, des stations et des régions sont bien effectuées par la fonction d'intensité. Celle-ci nous permet en plus de caractériser les stations à dominance d'événements de type givre et celles à dominance d'événements de type verglas par leur répartition au cours d'une saison de givrage atmosphérique.

La comparaison des années qui se chevauchent entre les deux bases de données permet d'apporter les conclusions suivantes sur la description des données et l'analyse des saisons de givrage. Les saisons de givrage communes aux deux stations sont cohérentes quand nous utilisons la classification par la fonction d'intensité. Les répartitions des événements durant les saisons de givrage pour la base de données SYGIVRE sont quasiment identiques à celles pour la base de données sur les PIM. Or, le nombre de données d'événements est

différent dans les deux bases. Nous avons beaucoup plus de données dans la base de données SYGIVRE que dans la base de données sur les PIM. Donc, la fonction d'intensité permet de caractériser correctement les répartitions des événements au cours de la saison de givrage atmosphérique sans, à priori, tenir compte du nombre d'événements. D'autre part, vu que les saisons communes ont la même répartition, nous pourrions considérer que ce serait le cas pour l'ensemble des saisons des deux bases de données et donc étudier indifféremment les saisons de l'une ou l'autre des bases de données.

CHAPITRE 4

ANALYSE SPATIALE

CHAPITRE 4

ANALYSES SPATIALES

Les événements de givre et de verglas ont une composante spatiale qui est plus ou moins bien prise en compte selon la disposition et le nombre de stations de mesure du réseau. Les relations spatiales existantes entre les stations sont importantes pour comprendre le phénomène de givrage atmosphérique et surtout, pour le prédire ou tout du moins établir des régions à risques. Quelques travaux sur la répartition spatiale du risque [9] ont utilisé des méthodes basées sur la distance géographique sans tenir compte des contraintes topographiques qui peuvent créer des microclimats locaux.

L'objectif de ce chapitre est de déterminer des groupements géographiques de stations en relation les unes avec les autres et d'expliquer ces groupements par des variables exogènes.

4.1 Événements conjoints

Nous nous intéressons aux relations existant entre les stations qui sont géographiquement proches les unes des autres et en particulier le fait qu'un regroupement de stations soit affecté par la même tempête de verglas ou de givre.

La notion d'événement a été utilisée précédemment pour décrire les stations. L'événement était considéré comme une donnée propre à une station. Or nous sommes en présence d'un phénomène spatio-temporel ce qui nous amène à définir la notion d' « événements conjoints » entre les stations.

L'événement conjoint est défini par l'ensemble des événements qui ont été causés par le même phénomène météorologique, pluie verglaçante, brouillard givrant, givre de nuage, etc.. Il est caractérisé par une période regroupant des accumulations et un groupe de stations affectées par ces accumulations. Cette notion se traduit différemment lorsque nous sommes en présence des données du réseau SYGIVRE ou du réseau de PIM. Cela est dû principalement à la différence de précision des mesures.

La base de données SYGIVRE à l'avantage de présenter une précision relativement grande, la précision sur la période d'accumulation pour une station est d'une heure.

Pour définir un événement conjoint, on considère que des accumulations qui sont simultanées font parti du même événement. Ainsi, un groupe de stations fait parti d'un même événement conjoint si les périodes d'accumulation propres à chaque station se chevauchent complètement durant un temps déterminé par le premier épisode apparaissant. La figure 4-1 montre différents regroupements pour la base de données SYGIVRE.

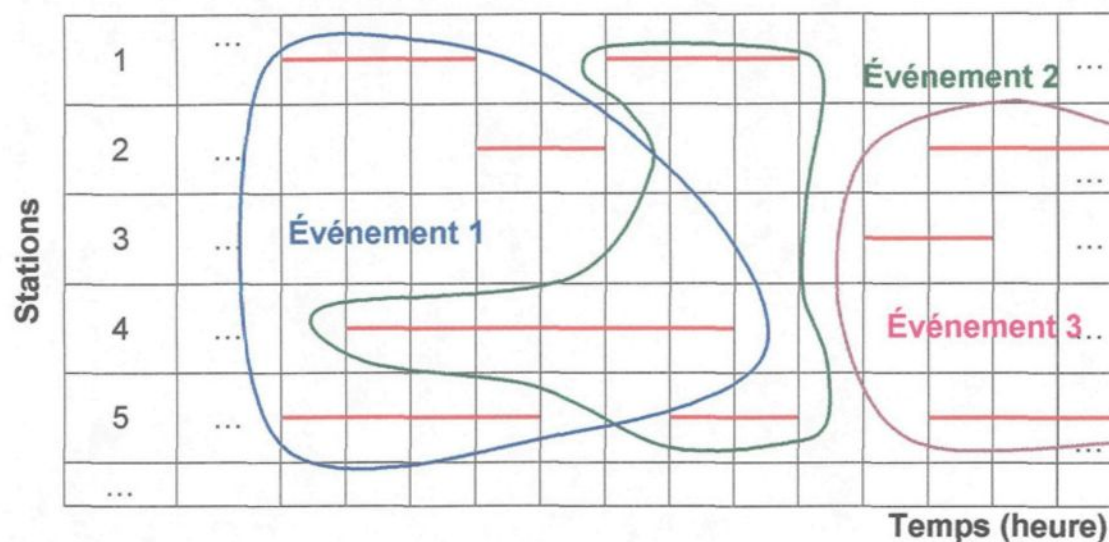


Figure 4-1 : Événements conjoints de la base de données SYGIVRE

Pour définir un événement conjoint, la première période d'accumulation apparaissant à une station sert de référence. Pour le cas où plusieurs périodes d'accumulations apparaîtraient en même temps (donc à des stations différentes), celle qui a la plus grande période d'accumulation est retenue pour la référence de l'événement. Dans l'exemple de la figure 4-1, la période de référence est de 4 heures et elle est déterminée par la station 5. Les stations 1,2 et 4 font parti du même événement puisque les périodes d'accumulation de ces stations chevauchent la période de référence. Dans le deuxième événement, c'est la station 1 qui donne la période de référence et les stations 4 et 5 contribuent à l'événement conjoint.

Dans le cas où une période d'accumulation couvrirait une plus grande durée que la période de référence, il est possible que celle-ci fasse partie de plusieurs

événements. Nous avons comme exemple, la première période d'accumulation de la station 4 qui est intégré à deux événements.

La détermination d'un événement conjoint en se basant sur les données du réseau de PIM pose un problème lié à la précision. Les stations concernées par un même événement ne peuvent être regroupées d'une manière fiable. Donc, étant donné que la précision est de une journée et que plus de 92% des événements présents durent 1 jour, nous considérons que des stations partagent le même événement si elles ont toutes eu un événement durant la même journée. De plus, si une accumulation se produit pendant 2 jours ou plus, il y aura autant d'événements conjoints que de jours pour l'événement.

La figure 4-2 montre la décomposition des événements pour la base de données sur les PIM.

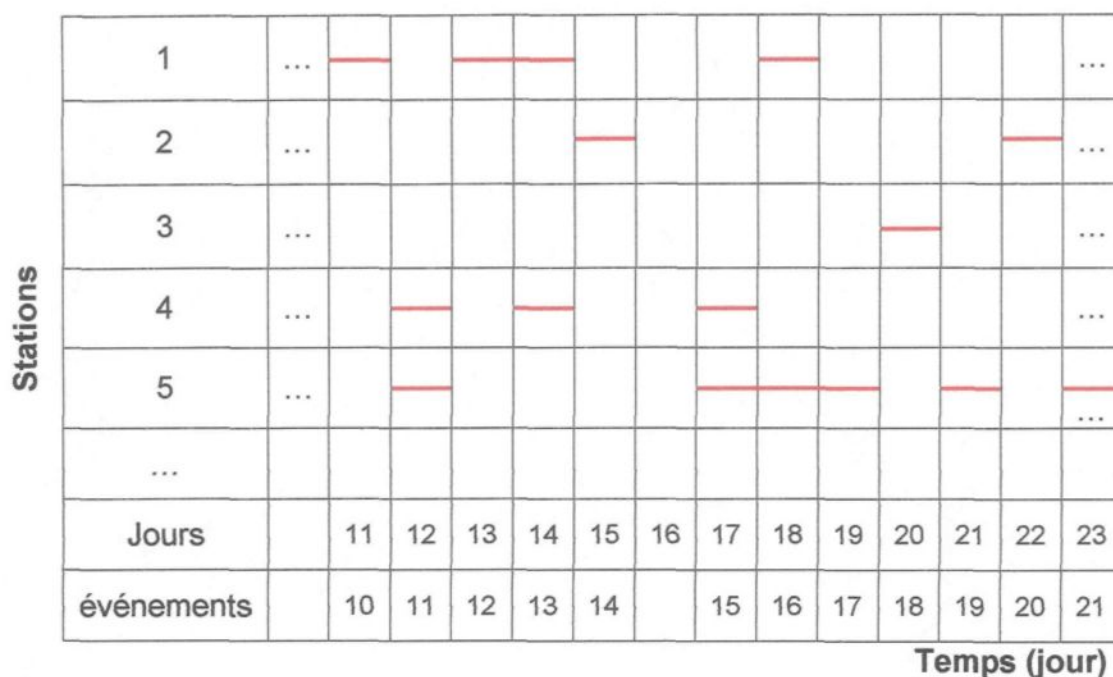


Figure 4-2 : Événements conjoints de la base de données sur les PIM

Nous pouvons constater par exemple que l'événement 13 contient les stations 1 et 4.

La séparation d'un événement durant plusieurs jours en autant d'événements est nécessaire pour éviter que des événements conjoints deviennent trop longs à cause des chevauchements. Le grand nombre de stations favorise le chevauchement de nombreux événements et l'apparition d'événements de grande durée. Or il est évident que ces derniers occultent donc de petits événements.

4.2 Distances entre stations

Pour définir des groupements « spatiaux » de stations, la distance géographique n'est pas particulièrement adaptée étant donné la présence de divers facteurs topographiques ou météorologiques. Des « barrières » sont placées entre les stations en fonction des conditions locales. Les vallées, les montagnes, les cours d'eau, les couloirs de vent, ... sont autant de paramètres qui font varier les conditions climatologiques d'un point à un autre. Dans ces conditions, nous faisons l'hypothèse que si deux stations sont proches, elles partagent les **mêmes** événements conjoints. Afin de définir la distance en termes d'événements, nous avons introduit la matrice Π correspondant aux probabilités que deux stations partagent un même événement. L'élément π_{ij} est la probabilité théorique que la station j soit affectée par un événement de givrage atmosphérique conditionnellement au fait que la station i soit affectée par le même événement. Un estimateur naturel de cette probabilité est donné par l'équation 4-1 [45]

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad \text{Eq. 4-1}$$

où n_{ij} est le nombre d'événements communs entre les stations i et j et n_i est le nombre d'événements présents à la station i . Pratiquement, l'estimateur p_{ij} doit tenir compte des différences d'ouverture des stations et le calcul ne se fait que pour les périodes pendant lesquelles les deux stations i et j sont en opération.

Les matrices Π ou P ne sont pas symétriques et ainsi ne peuvent pas servir de distance. On obtient une distance en considérant la matrice D définie par les équations 4-2 ou 4-3.

$$d_{i,j} = 1 - \frac{p_{ij}p_{ji}}{p_{ij} + p_{ji} - p_{ij}p_{ji}} \quad \text{Eq. 4-2}$$

$$d_{i,j} = 1 - \frac{n_{ij}}{n_i + n_j - n_{ij}} \quad \text{Eq. 4-3}$$

L'élément d_{ij} est directement lié à la probabilité que deux stations partagent le même événement lorsque au moins l'une d'entre elles en est affectée. C'est une distance qui varie de 0 à 1. Une distance de 0, c'est-à-dire égalité entre les stations, implique que tous les événements présents à une station sont communs à l'autre station. Une distance de 1 implique qu'aucun événement commun n'existe entre les deux stations.

Le nombre d'événements qui est utilisé pour évaluer la probabilité p_{ij} est important puisque, sous un modèle binomial, la variance de p_{ij} est $\frac{p_{ij}(1-p_{ij})}{n_i}$ et ainsi, la précision de l'estimateur dépend du nombre d'événements observés n_i . Pour éviter de grouper deux stations qui ont trop peu d'observations, un intervalle de confiance de niveau 95% est construit autour de p_{ij} . Si 0 est dans l'intervalle, la

probabilité est fixée à 0. Cela veut dire qu'on ne considère que des probabilités qui sont significativement différentes de 0 (au niveau 2.5%).

4.3 Regroupements par station

La matrice de distance P est utilisée pour faire un groupement des stations sur la base des événements de givre et de verglas, partagés par les stations. Nous pouvons dire que deux stations sont spatialement proches si elles ont une distance d_{ij} proche de 0 et loin si cette distance est proche de 1.

Les outils développés ont été appliqués sur les données de verglas, de givre et sur l'ensemble des données de la base SYGIVRE. Les événements de givre ont une structure différente des événements de verglas, c'est pourquoi, des groupements sont faits pour chaque type de précipitation. Les deux types confondus sont aussi intéressants pour repérer les stations semblables dans les 2 contextes. Les résultats des classifications hiérarchiques par la méthode des arbres, sont donnés sur les figures 4-3, 4-4 et 4-5. Les stations pour lesquelles le nombre d'événements est trop petit n'ont pas été considérées dans la classification hiérarchique.

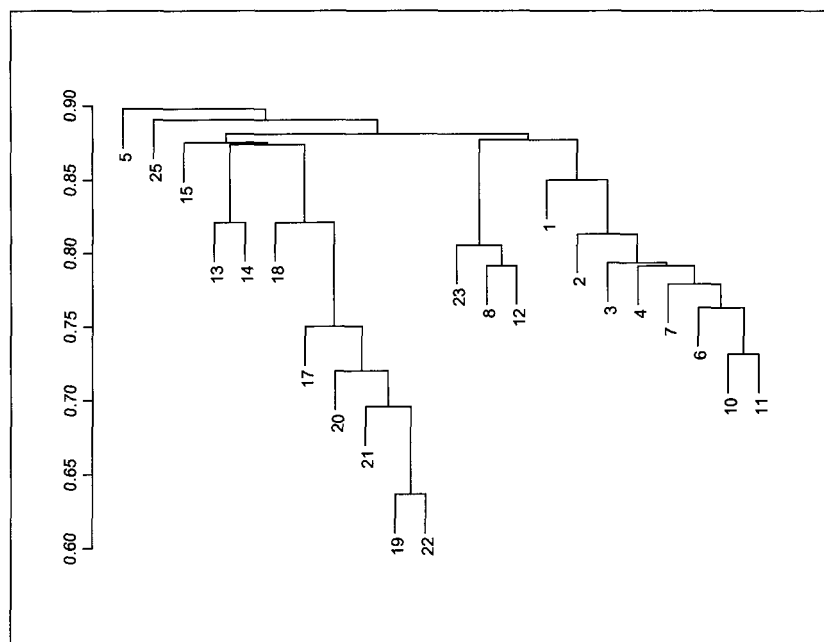


Figure 4-3 : Classification hiérarchique pour les événements de verglas

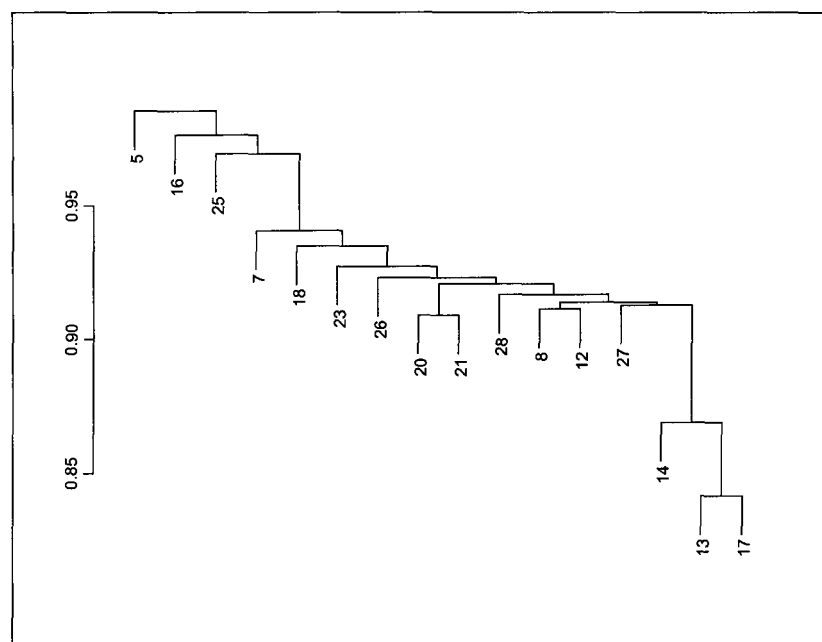


Figure 4-4 : Classification hiérarchique pour les événements de givre

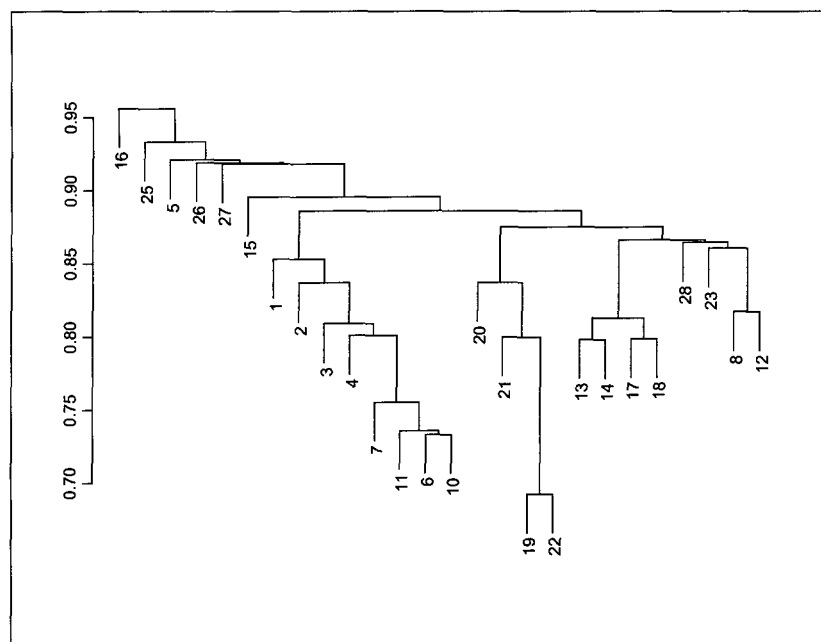


Figure 4-5 : Classification hiérarchique pour tous les événements

Le groupe composé des stations 1-2-3-4-6-7-10-11 se retrouve sur les classifications pour les données de verglas et pour l'ensemble des événements. En ce qui concerne les données de givre, ces stations ne peuvent être regroupées. Cela s'explique par le fait qu'elles sont classées comme de type verglas et que très peu d'événements de givre sont présents dans ces stations. De retrouver ce groupe dans la base totale est normal car ces stations n'étant pas classées dans la base de données de givre, elles n'ont donc pas de relations proches avec les autres stations. Enfin, ce regroupement s'effectue avec des probabilités allant de 30 à 15%.

Deux groupes de deux stations se retrouvent sur toutes les classifications, ce sont les groupes : 8-12 et 13-14. Ces stations sont de type givre. Il est donc normal

de les voir se regrouper pour des données de givre, mais en plus, elles se regroupent bien pour des données de verglas et pour la base de données entière. La particularité de ces stations vient du fait que, bien qu'elles soient de type givre, elles ont aussi des événements de verglas. Ces stations partagent donc les mêmes événements de givre et de verglas. Les probabilités de regroupement de ces stations sont de 20% pour l'ensemble des événements.

Deux stations sont à considérer à part, la numéro 9 et la numéro 24. En effet, ces stations n'ont pu être regroupées pour n'importe quel type d'accumulation. La raison de ce non-regroupement vient du nombre d'événements présent à ces deux stations : 1 et 4 événements pour les stations 24 et 9 respectivement. Elles ont donc été retirées de la classification.

Les données disponibles pour la base de données sur les PIM ne permettent pas de faire la différence entre les événements de type givre et ceux de type verglas c'est pourquoi toutes les données sont traitées ensembles. Le résultat de la classification est donné par la figure 4-6. La classification hiérarchique des stations de la base de données sur les PIM ne permet pas de créer des groupes de stations distinctes comme celles de la base de données SYGIVRE.

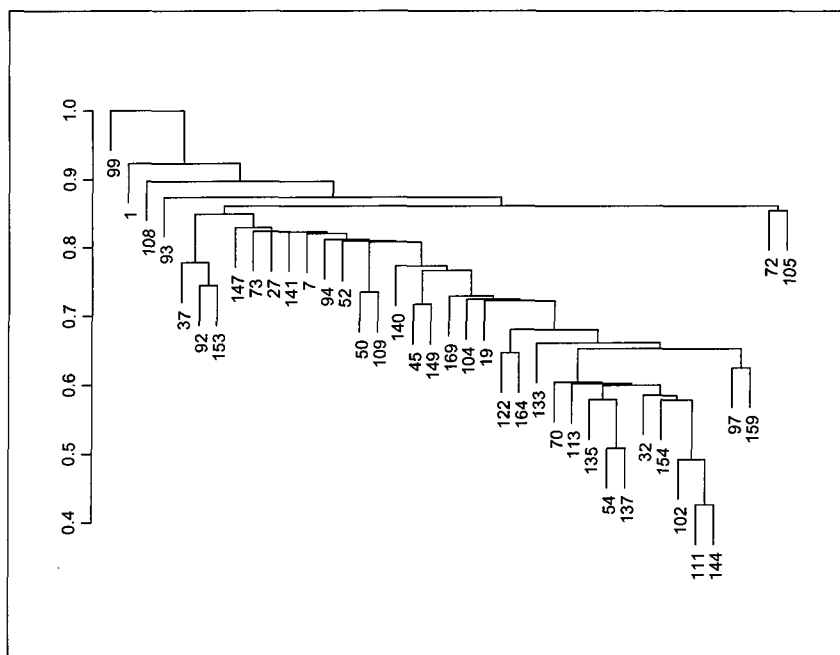


Figure 4-6 : Classification hiérarchique pour tous les événements du réseau sur les PIM

Il est intéressant de noter que les probabilités sont meilleures que pour l'autre base du fait du plus grand nombre d'observations et d'une moins bonne précision dans les données. En effet, la précision étant d'une journée, les chevauchements d'événements sont plus présents, ce qui implique de plus grandes probabilités à partager un événement.

4.3.1 Positionnements géographiques des regroupements

Le but de la classification hiérarchique est de définir des groupes de stations et nous supposons que ces groupes définissent des zones géographiques cohérentes. Pour vérifier cette hypothèse, il est nécessaire de visualiser ces

groupements sur une carte géographique comprenant l'emplacement des différentes stations.

4.3.1.1 Base de données SYGIVRE

Les regroupements de la classification hiérarchique de cette base de données sont représentés sur les figures 4-7, 4-8 et 4-9 pour les groupements des événements de verglas, de givre et les deux combinés, respectivement.

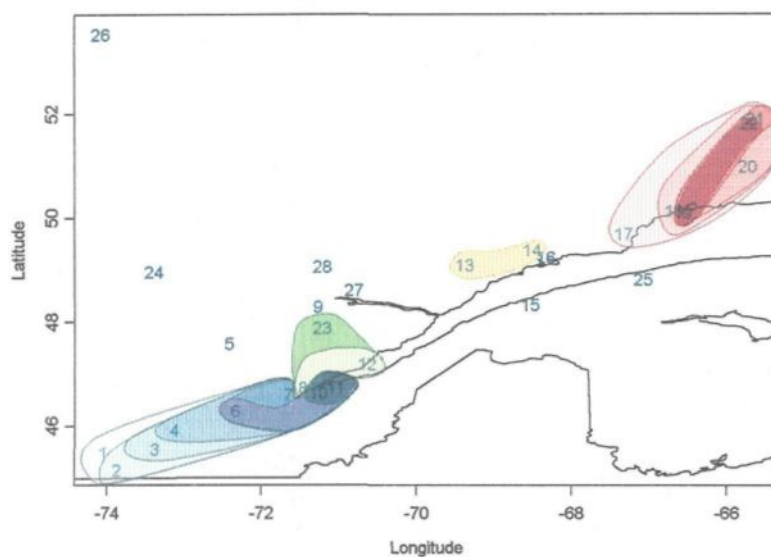


Figure 4-7 : Représentation géographique des groupements pour les événements de verglas

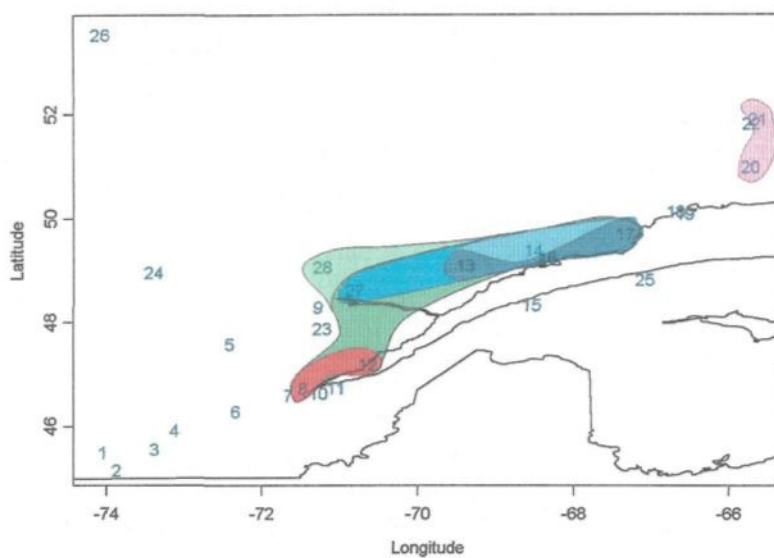


Figure 4-8 : Représentation géographique des groupements pour les événements de givre

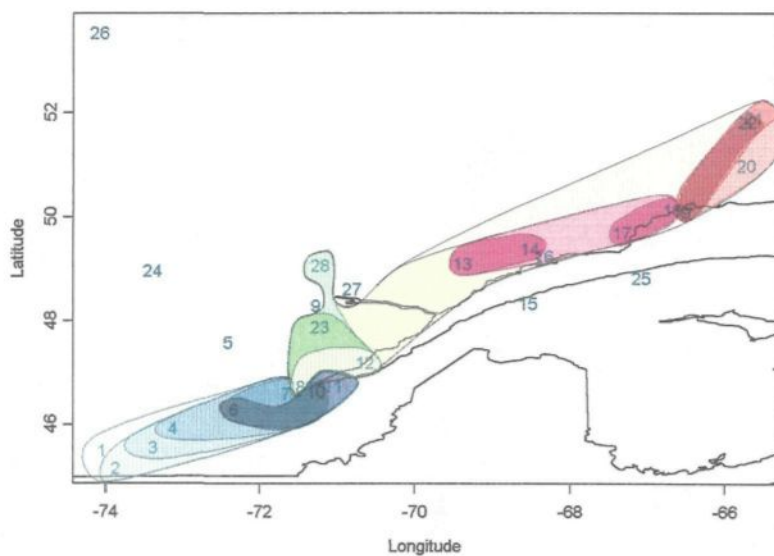


Figure 4-9 : Représentation géographique des groupements pour tous les événements

Les différentes couleurs des patterns indiquent des groupements différents. La nuance de couleur indique les différentes probabilités (la plus foncée pour les groupements à plus forte probabilité et inversement pour la plus claire).

Les groupements des données de verglas ont une correspondance géographique bien nette. Les trois groupements forment des zones cohérentes. Les stations concernées par un groupe ne sont pas dispersées. Nous avons donc de bons regroupements sur les stations de la région sud (Montréal et Québec) ainsi que sur la haute Côte Nord.

Pour ce qui est du givre, les stations regroupées se situent sur une zone partant de Québec et allant jusqu'à la basse Côte Nord. Ce regroupement est homogène pour l'intégration des stations.

Finalement, lorsque toutes les données sont utilisées, les deux précédentes classifications hiérarchiques sont fusionnées. En effet, nous retrouvons les mêmes groupes géographiques définis précédemment. Malgré tout, quelques petits changements interviennent. La station 27, regroupée pour des données de givre se trouve groupée avec une moins bonne probabilité quand on considère l'ensemble des données.

4.3.1.2 Base de données sur les PIM

La classification hiérarchique de cette base de données est plus difficile à mettre en œuvre sur une carte car il n'y a pas plusieurs groupements principaux

comme dans le cas des données du réseau SYGIVRE. Néanmoins, la figure 4-10 nous donne les principaux regroupements. Les différences de couleurs sont sur le même principe que pour la base de données SYGIVRE. Les regroupements en pointillés sont ceux que nous aurions si les stations du regroupement principal (en bleu) étaient retirées. Les regroupements de cette base sont similaires à ceux de l'autre base. Il est donc possible de faire des comparaisons afin de vérifier les résultats produits par la base de données SYGIVRE.

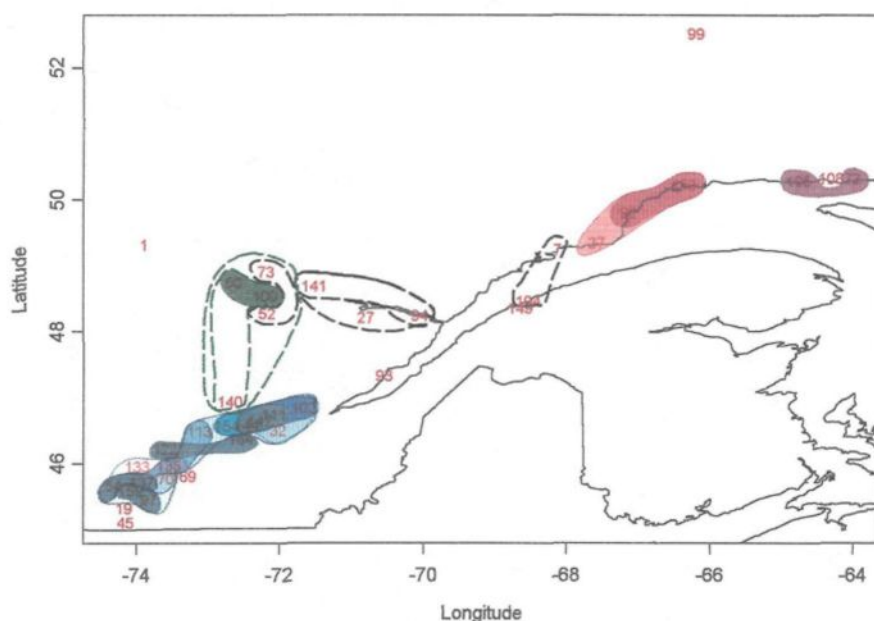


Figure 4-10 : Représentation géographique des regroupements pour les événements du réseau de PIM

Le regroupement principal de stations s'est effectué dans la région allant de Montréal à Québec. C'est une zone qui subit beaucoup d'événements et qui est

relativement bien fournie en stations. Au niveau de la Côte Nord, nous retrouvons certains petits regroupements. Dans le but de regrouper les stations restantes du réseau de PIM, nous avons enlevé les stations des groupes déjà effectués. Nous obtenons de nouveaux regroupements ayant certes de moins bonnes probabilités mais qui permettent de faire ressortir de nouveaux groupes sans être occultés par les précédents. Ceux-ci sont identiques à ceux définis pour les stations du réseau SYGIVRE. Ces groupes, représentés en traits pointillés sur la figure 4-10, sont situés au niveau du Saguenay / Lac St. Jean, les Laurentides et la basse Côte Nord. Finalement, en regroupant toutes ces associations de stations, nous obtenons trois grands groupes de stations situés, comme pour la base de données SYGIVRE, dans la région de Montréal, de Québec / Saguenay / Lac St. Jean et dans la région de la Côte Nord.

4.3.2 Discussion

Nous savons que les stations de la base de données SYGIVRE sont différenciées soit en station de type « givre », soit en station de type « verglas ». Nous retrouvons cette caractéristique au niveau des regroupements. Certaines stations n'apparaissent groupées que dans les groupements de stations dans le cas des données de verglas et d'autres pour les données de givre.

Pour les stations 8 et 12, nous constatons qu'elles sont toujours regroupées pour les deux types d'événements. Elles sont donc indifférentes au type de l'accumulation. Cela peut être dû à la position géographique de ces stations. Elles

sont placées dans une zone où apparaissent pratiquement en même quantité, aussi bien des événements de givre que de verglas.

La base de données sur les PIM présente les mêmes zones de regroupement, il est donc intéressant de pouvoir l'utiliser pour comparer les résultats. Ils seront d'autant meilleurs pour les données de type verglas car le regroupement principal se situe dans la région allant de Montréal à Québec, région comportant le regroupement principal de la base de données SYGIVRE et dont les événements sont à dominance de verglas. Nous avons pu constater aussi que les probabilités de regroupement étaient plus grandes pour la base de données sur les PIM, une hypothèse pour expliquer ce phénomène serait le manque de précision dans les données temporelles.

4.4 Modélisation des regroupements

4.4.1 Régression logistique

La classification des stations nous donne des regroupements qui sont conçus à partir des aspects spatiaux et temporels des événements. Il semble clair que certains facteurs peuvent influencer les probabilités p_{ij} . Nous pouvons penser par exemple qu'une température très froide sur la Côte Nord créera des conditions favorables à la formation d'épisodes de givre. Ainsi, il est utile de relier différentes variables aux regroupements de stations et de déterminer leur rôle.

Considérons les stations i et j , nous cherchons à modéliser π_{ij} en fonction des variables disponibles et ayant des raisons d'influencer la probabilité. Pour modéliser les groupes ou plus précisément les probabilités π_{ij} , on considère une régression logistique de la forme

$$\pi_{ij} = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k}} \quad \text{Eq. 4-4}$$

où $x_1 \dots x_k$ sont les variables explicatives.

Pour la base de données SYGIVRE, les variables utilisées pour effectuer la régression sont : le poids total de l'accumulation, la durée et la température de l'événement. Pour la base de données sur les PIM, les variables utilisées sont la durée et l'épaisseur de l'accumulation de l'événement.

La variable à expliquer est celle représentant le partage des événements. Elle se traduit par une valeur de 1 ou de 0 suivant que l'événement présent a une station l'est aussi à une autre station ou non, respectivement

Dans un premier temps, on suppose un comportement homogène pour les stations d'un même groupe (groupes définis dans la section précédente). Nous supposons donc des coefficients identiques ($\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$) pour les régressions du même groupe. Les paramètres sont estimés en bloc pour chaque regroupement. Dans un deuxième temps, une régression pour chaque élément π_{ij} d'un groupe est

effectuée pour vérifier si les variables qui influencent le regroupement sont les mêmes pour chaque membre du groupe, c'est-à-dire pour chaque paire (i, j) où i et j sont dans le même groupe.

On considère les trois principaux groupements de la base de données SYGIVRE. Le premier est situé sur la région de Montréal jusqu'à Québec, il comporte 8 stations : 1-2-3-4-6-7-10-11. Le second est situé sur la région de Québec et du Saguenay / Lac St. Jean, il comporte 3 stations : 8-12-23. Le dernier groupe est situé sur la Côte Nord, il comporte 8 stations 13-14-17-18-19-20-21-22. Ces trois groupes caractérisent 3 types de stations ; celles à dominance d'événements de verglas (1^{er} groupe), à dominance de givre (3^{ième} groupe) et finalement celles sans type d'accumulations prépondérantes au niveau des données (2^{ième} groupe).

À titre de comparaison, des regroupements de stations du réseau de PIM dans les mêmes régions ont été établis. Trois groupes de stations ont donc été choisis : le premier groupe dans la région de Montréal à Québec, il comporte 13 stations : 32-54-70-97-102-111-113-133-135-137-144-154-159, le second dans la région du Saguenay / Lac St. Jean, il comporte 5 stations : 50-52-73-109-140 et le dernier est situé sur la Côte Nord, il comporte 5 stations : 37-72-92-105-153.

4.4.2 Résultats

Les coefficients associés à chaque variable ainsi que les valeurs « t » pour le test $H_0 : \beta_i = 0$ contre $H_1 : \beta_i \neq 0$ associées sont données dans les tableaux 4-1, 4-2 et 4-3, pour le groupe 1 (région de Montréal) et les événements de type verglas, givre et les deux types combinés respectivement.

	Coefficient	Erreur Standard	t value
Constante	-2.4906	0.0880	-28.3114
Poids	-0.0013	0.0003	-4.4888
Durée	0.5891	0.0378	15.5631
Température	-0.0026	0.0151	-1.7380

Table 4-1 : Coefficients de la régression des stations du groupe 1 pour les événements de type verglas du réseau SYGIVRE

	Coefficient	Erreur Standard	t value
Constante	-4.3870	0.6095	-7.1978
Poids	0.0016	0.0021	0.7500
Durée	0.7523	0.1781	4.2237
Température	-0.0798	0.0338	-2.3620

Table 4-2 : Coefficients de la régression des stations du groupe 1 pour les événements de type givre du réseau SYGIVRE

	Coefficient	Erreur Standard	t value
Constante	-2.4946	0.0846	-29.4977
Poids	-0.0013	0.0003	-4.5493
Durée	0.6060	0.0371	16.3188
Température	-0.0025	0.0094	-0.2703

Table 4-3 : Coefficients de la régression des stations du groupe 1 pour tous les du réseau SYGIVRE

Chaque variable joue un rôle mais pas forcément dans toutes les régressions (donc dépendamment du type de l'événement). Par contre, c'est clairement la variable « durée » qui est la plus importante, et cela pour chacune des trois régressions. Dans le cas des événements de verglas et pour les deux types combinés, le poids joue aussi un rôle non négligeable. Dans le cas des événements de givre, la température est le deuxième paramètre à tenir compte.

Les coefficients de corrélation entre les différentes variables des différents types d'événements sont donnés dans les tableaux 4-4, 4-5 et 4-6 pour la régression sur les événements de type verglas, givre et les deux combinés ensemble respectivement. Il en résulte que le même type de corrélation existe entre la durée et le poids d'un événement. Pour les événements de givre seuls, cette corrélation est moins importante.

	Poids	Durée
Durée	0.7439	
Température	0.0512	0.0046

Table 4-4 : Coefficients de corrélation entre les variables des stations du groupe 1 du réseau SYGIVRE pour les événements de verglas

	Poids	Durée
Durée	0.4785	
Température	-0.1309	-0.1564

Table 4-5 : Coefficients de corrélation entre les variables des stations du groupe 1 du réseau SYGIVRE pour les événements de givre

	Poids	Durée
Durée	0.7413	
Température	0.0999	0.0681

Table 4-6 : Coefficients de corrélation entre les variables des stations du groupe 1 du réseau SYGIVRE pour tous les événements

Dans le but de valider les régressions, les tableaux 4-7, 4-8 et 4-9 donnent les résultats des prédictions à partir des coefficients déterminés par la régression pour le modèle sur les événements de verglas, de givre et les deux types combinés respectivement.

		Prédits	
		0	1
Observés	0	2735	86
	1	625	160

Table 4-7 : Prédictions pour les stations du groupe 1 du réseau SYGIVRE pour les événements de verglas

		Prédits	
		0	1
Observés	0	308	6
	1	38	9

Table 4-8 : Prédictions pour les stations du groupe 1 du réseau SYGIVRE pour les événements de givre

		Prédits	
		0	1
Observés	0	3051	84
	1	674	158

Table 4-9 : Prédictions pour les stations du groupe 1 du réseau SYGIVRE pour tous les événements

La prédiction à partir de l'ensemble des données est juste à 80.89%. La prédiction pour les événements de givre est meilleure que pour ceux de verglas,

87.81% contre 80.28%. Il est à noter que les trois modèles donnent un taux de faux négatifs très grand. Cela veut dire qu'on prédit trop souvent une absence de lien entre deux stations quand il y a effectivement des événements communs.

Dans l'optique d'une analyse plus fine du lien existant entre les stations, on considère les stations adjacentes. La figure 4-1 représente les connexions possibles entre deux stations adjacentes pour la propagation des événements.

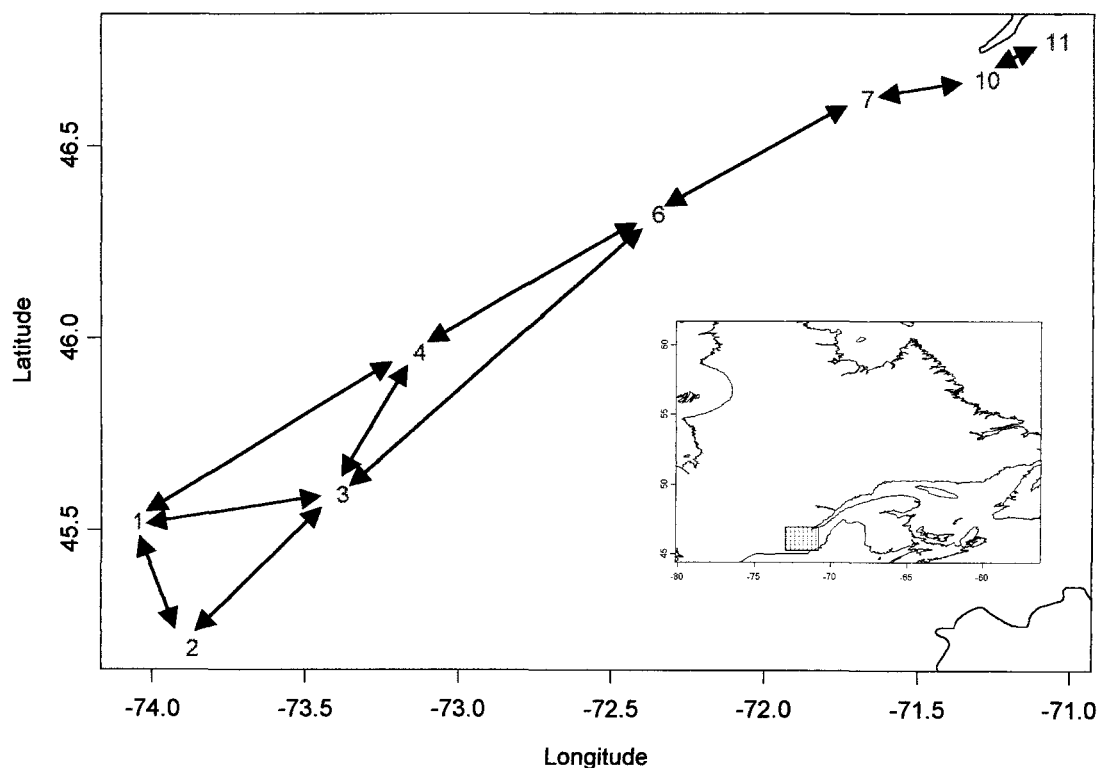


Figure 4-11 : Connexions entre deux stations adjacentes du groupe 1 du réseau SYGIVRE

Le tableau 4-10 donne les variables dont les coefficients sont significativement différents de 0 au niveau 5%. Les lignes correspondent à l'indice i tandis que les colonnes correspondent à l'indice j du paramètre π_{ij} . Dans le tableau, les paramètres sont notés T , D et P pour la température, la durée et le poids respectivement.

\nearrow	1	2	3	4	6	7	10	11
1		E	P/T	P				
2	T/P		D					
3	T/D	P/D		D	P/D			
4	T/D		T/D		T/D			
6			T	D		P/D		
7					D		D	
10						T/D		T/D
11							D	

Table 4-10 : Paramètres de la régression pour les connexions des stations du groupe 1 du réseau SYGIVRE

En majorité, le paramètre expliquant les probabilités que deux stations partagent le même événement est la durée, ce qui correspond bien à la régression effectuée sur l'ensemble des stations. Il n'y a pas de différences importantes entre les stations donc nous pouvons dire que c'est un groupe homogène.

Les coefficients associés à chaque variable ainsi que les valeurs « t » pour le test $H_0 : \beta_i = 0$ contre $H_1 : \beta_i \neq 0$ associées sont données dans les tableaux 4-11, 4-12 et 4-13, pour le groupe 2 (région de Québec) et les événements de type verglas, givre et les deux types combinés respectivement.

	Coefficient	Erreur Standard	t value
Constante	-1.1464	0.1003	-11.4326
Poids	-0.0001	0.0001	-0.8443
Durée	0.0673	0.0161	4.1910
Température	0.0170	0.0524	0.3242

Table 4-11 : Coefficients de la régression des stations du groupe 2 pour les événements de type verglas du réseau SYGIVRE

	Coefficient	Erreur Standard	t value
Constante	-0.9944	0.1659	-5.9927
Poids	-0.0005	0.0003	-1.5867
Durée	0.0953	0.0229	4.1561
Température	0.1138	0.0216	5.2340

Table 4-12 : Coefficients de la régression des stations du groupe 2 pour les événements de type givre du réseau SYGIVRE

	Coefficient	Erreur Standard	t value
Constante	-1.0721	0.0763	-14.0450
Poids	-0.0001	0.0001	-1.3197
Durée	0.0716	0.0108	6.6196
Température	0.0958	0.0140	6.8536

Table 4-13 : Coefficients de la régression des stations du groupe 2 pour tous les du réseau SYGIVRE

Dans le cas d'événements de verglas, seul le paramètre concernant la durée est celui qui explique ce groupement. Dans le cas d'événements de givre ou pour les deux types confondus, deux paramètres expliquent le groupement, la durée et la température.

Les coefficients de corrélation entre les différentes variables sont donnés dans les tableaux 4-14, 4-15 et 4-16 pour la régression sur les événements de type verglas, givre et les deux types confondus.

	Poids	Durée
Durée	0.7469	
Température	-0.0947	-0.0795

Table 4-14 : Coefficients de corrélation entre les variables des stations du groupe 2 du réseau SYGIVRE pour les événements de verglas

	Poids	Durée
Durée	0.8651	
Température	0.1591	0.2190

Table 4-15 : Coefficients de corrélation entre les variables des stations du groupe 2 du réseau SYGIVRE pour les événements de givre

	Poids	Durée
Durée	0.6909	
Température	0.1583	0.1592

Table 4-16 : Coefficients de corrélation entre les variables des stations du groupe 2 du réseau SYGIVRE pour tous les événements

Pour tous les types d'événements (verglas, givre et les deux confondus), il existe une forte corrélation entre la durée et la température.

Dans le but de valider ces régressions, les tableaux 4-17, 4-18 et 4-19 donnent les résultats des prédictions à partir des coefficients déterminés par la régression pour le modèle sur les événements de verglas, de givre et les deux types combinés respectivement.

		Prédits	
		0	1
Observés	0	974	20
	1	425	14

Table 4-17 : Prédictions pour les stations du groupe 2 du réseau SYGIVRE pour les événements de verglas

		Prédits	
		0	1
Observés	0	894	13
	1	235	10

Table 4-18 : Prédictions pour les stations du groupe 2 du réseau SYGIVRE pour les événements de givre

		Prédits	
		0	1
Observés	0	1874	27
	1	664	20

Table 4-19 : Prédictions pour les stations du groupe 2 du réseau SYGIVRE pour tous les événements

La prédiction à partir de l'ensemble des données est juste à 73.27%. La prédiction relative aux événements de givre est meilleure que celle relative aux

événements de verglas, 78.47% contre 68.94%. Il est encore à noter que pour les trois modèles, le taux de faux négatifs est très grand.

On considère toujours les stations adjacentes pour une étude plus fine du lien existant entre les stations. La figure 4-12 représente les connexions possibles entre les stations du groupe au niveau événements.

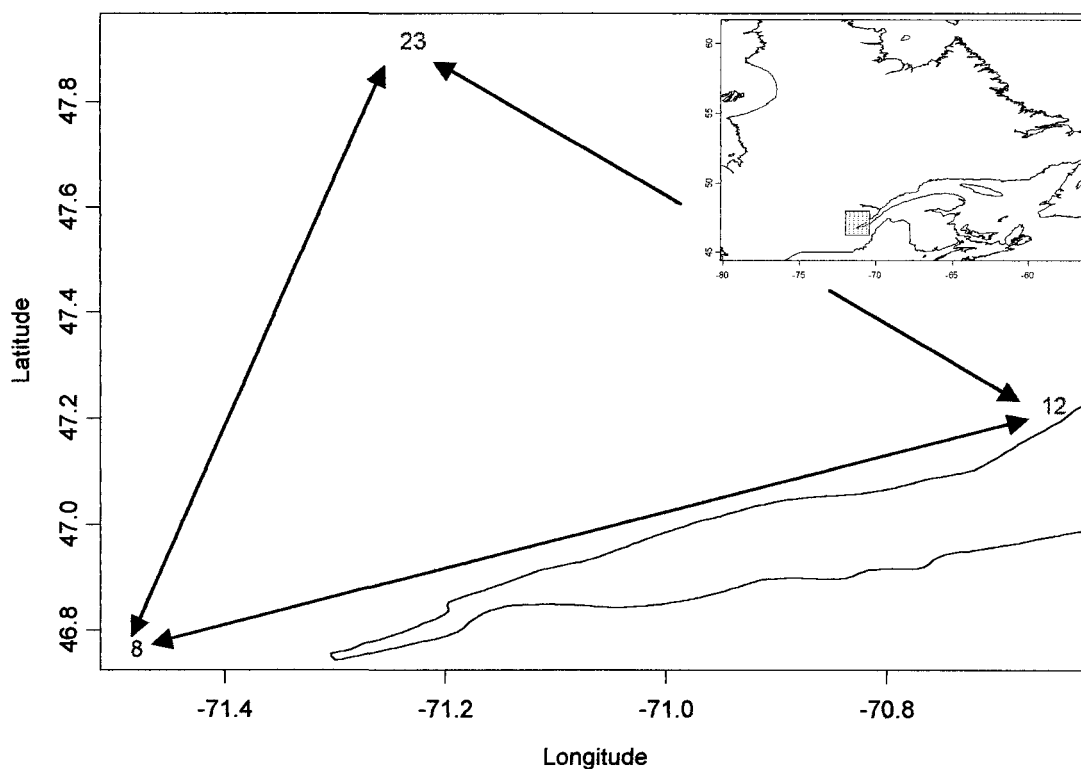


Figure 4-12 : Connexions entre deux stations adjacentes du groupe 2 du réseau SYGIVRE

Le tableau 4-20 nous donne les variables dont les coefficients sont significativement différents de 0 au niveau 5%. Les lignes correspondent à l'indice i tandis que les colonnes correspondent à l'indice j du paramètre π_{ij} . Dans le tableau, les mêmes abréviations que pour le groupe précédent sont utilisées, à savoir T , D et P pour la température, la durée et le poids respectivement.

↗	8	12	23
8		T/D	T
12	D		P
23	T/D	T/P/D	

Table 4-20 : Paramètres de la régression pour les connexions des stations du groupe 2 du réseau SYGIVRE

Pour des événements ne se déplaçant pas du sud vers le nord, la durée et la température sont les deux principaux paramètres qui expliquent les probabilités que deux stations partagent le même événement. Pour les autres événements, dont le déplacement est du sud au nord, la durée n'est pas retenue pour expliquer le partage des événements mais plutôt la température ou le poids selon que l'événement vienne du sud-ouest ou du sud-est respectivement.

Les coefficients associés à chaque variable ainsi que les valeurs « t » pour le test $H_0 : \beta_i = 0$ contre $H_1 : \beta_i \neq 0$ associées sont données dans les tableaux 4-21, 4-22 et 4-23, pour le groupe 3 (région de la Côte Nord) et les événements de type verglas, givre et les deux types combinés respectivement.

	Coefficient	Erreur Standard	t value
Constante	-1.3775	0.0416	-33.0739
Poids	-0.0003	0.0001	-5.5048
Durée	0.1335	0.0095	14.1075
Température	-0.1025	0.0157	-6.5109

Table 4-21 : Coefficients de la régression des stations du groupe 3 pour les événements de type verglas du réseau SYGIVRE

	Coefficient	Erreur Standard	t value
Constante	-1.7191	0.0568	-30.2561
Poids	0	0.0002	0.0148
Durée	0.1796	0.0089	20.1539
Température	0.0435	0.0049	8.9004

Table 4-22 : Coefficients de la régression des stations du groupe 3 pour les événements de type givre du réseau SYGIVRE

	Coefficient	Erreur Standard	t value
Constante	-1.5581	0.0324	-48.0854
Poids	-0.0004	0.0000	-8.8155
Durée	0.1683	0.0060	27.9692
Température	0.0478	0.0033	14.2994

Table 4-23 : Coefficients de la régression des stations du groupe 3 pour tous les du réseau SYGIVRE

Toutes les variables contribuent au regroupement des stations à l'exception du poids pour les événements de type givre qui ne joue aucun rôle. Par contre, la variable durée est la variable prépondérante pour les trois régressions.

Les coefficients de corrélation entre les différentes variables sont donnés dans les tableaux 4-24, 4-25 et 4-26 pour la régression sur les événements du type verglas, givre et les deux types combinés respectivement.

	Poids	Durée
Durée	0.8390	
Température	-0.1206	-0.1295

Table 4-24 : Coefficients de corrélation entre les variables des stations du groupe 3 du réseau SYGIVRE pour les événements de verglas

	Poids	Durée
Durée	0.5500	
Température	0.0462	0.1537

Table 4-25 : Coefficients de corrélation entre les variables des stations du groupe 3 du réseau SYGIVRE pour les événements de givre

	Poids	Durée
Durée	0.7278	
Température	0.1623	0.1728

Table 4-26 : Coefficients de corrélation entre les variables des stations du groupe 3 du réseau SYGIVRE pour tous les événements

Une forte corrélation existe entre la durée et le poids pour les événements de type verglas et les deux types combinés tandis que cette corrélation est moins importante pour les événements de type givre.

Les validations des régressions sont données par les tableaux 4-27, 4-28 et 4-29 qui donnent les résultats des prédictions à partir des coefficients déterminés par la régression pour le modèle sur les événements de verglas, de givre et les deux types combinés.

		Prédits	
		0	1
Observés	0	3928	189
	1	1483	256

Table 4-27 : Prédictions pour les stations du groupe 3 du réseau SYGIVRE pour les événements de verglas

		Prédits	
		0	1
Observés	0	8861	188
	1	1717	235

Table 4-28 : Prédictions pour les stations du groupe 3 du réseau SYGIVRE pour les événements de givre

		Prédits	
		0	1
Observés	0	12774	392
	1	3203	488

Table 4-29 : Prédictions pour les stations du groupe 3 du réseau SYGIVRE pour tous les événements

La prédiction à partir de l'ensemble des données est juste à 78.67%. La prédiction concernant les événements de givre est meilleure que celle des

événements de verglas, 81.68% contre 71.4%. Il y a toujours la présence d'un grand taux de faux négatifs.

On considère toujours les stations adjacentes pour une étude plus fine du lien existant entre les stations. La figure 4-13 représente les connexions possibles entre les stations du groupe au niveau événements.

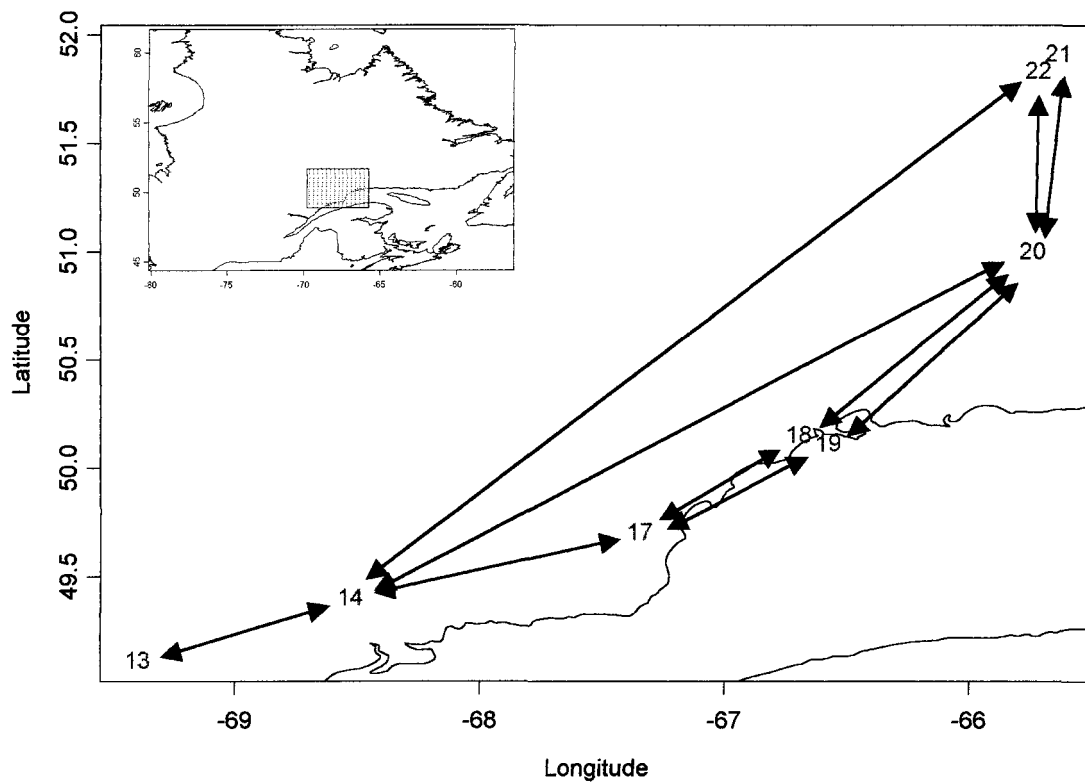


Figure 4-13 : Connexions entre deux stations adjacentes du groupe 3 du réseau SYGIVRE

Le tableau 4-30 nous donne les variables dont les coefficients sont significativement différents de 0 au niveau 5%. Les lignes correspondent à l'indice i

tandis que les colonnes correspondent à l'indice j du paramètre π_{ij} . Les mêmes abréviations que pour les autres régressions sont utilisées avec une abréviation supplémentaire \emptyset correspondant à aucun paramètre.

↗	13	14	17	18	19	20	21	22
13		D						
14	T/D		T/D			D		\emptyset
17		T/D		T/D	D			
18			D		D	T/P/D		
19			T/D	T/D		T		
20		T/D		T/P/D	D		T/D	T/P/D
21						T		P
22		\emptyset				T/P/D	T/P/D	

Table 4-30 : Paramètres de la régression pour les connexions des stations du groupe 3 du réseau SYGIVRE

En majorité, les paramètres expliquant les probabilités que deux stations partagent le même événement sont la durée et la température, ce qui correspond bien à la régression effectuée sur l'ensemble des stations et de la base de données. La durée est le paramètre intervenant principalement pour pratiquement toutes les stations. Nous constatons qu'entre les stations 14 et 22 il n'y a aucun paramètre qui explique le partage d'événements. Ceci peut s'expliquer par le fait que ces deux stations sont très éloignées géographiquement ce qui rend peu probable qu'un événement passe par ces deux stations. Les stations 14 et 20 sont, elles aussi, éloignées et nous constatons que c'est la durée qui explique le partage des événements entre ces deux stations.

Les régressions appliquées aux trois groupes de stations du réseau de PIM situés dans les trois mêmes régions que les groupes du réseau SYGIVRE sont utilisées pour vérifier et comparer les résultats précédents.

Les coefficients associés à chaque variable ainsi que les valeurs « t » pour le test $H_0 : \beta_i = 0$ contre $H_1 : \beta_i \neq 0$ associées sont données dans le tableau 4-31 pour le groupe 1 (région de Montréal).

	Coefficient	Erreur Standard	t value
Constante	-1.2239	0.0436	-16.6256
Durée	0.6274	0.0633	9.9151
Épaisseur	-0.0005	0.0008	-0.5992

Table 4-31 : Coefficients de la régression des stations du groupe 1 du réseau de PIM

La durée d'un événement est le paramètre qui explique le mieux la probabilité que deux stations partagent le même événement pour ce groupement, ce qui confirme les résultats pour la base de données SYGIVRE.

Le coefficient de corrélation entre les deux variables est donné dans le tableau 4-32.

	Durée
Épaisseur	0.0359

Table 4-32 : Coefficients de corrélation des stations du groupe 1 du réseau de PIM

Aucune corrélation entre les deux variables n'est à noter au contraire de la base de données SYGIVRE qui avait une corrélation entre la durée et le poids.

Dans le but de valider les régressions, le tableau 4-33 donne les résultats des prédictions à partir des coefficients déterminés par la régression.

		Prédits	
		0	1
Observés	0	5205	394
	1	2844	454

Table 4-33 : Prédictions pour les stations du groupe 1 du réseau de PIM

La prédiction est juste à 63.60%. Celle-ci est plus basse que pour la prédiction avec les événements de la base de données SYGIVRE. De plus, la prédiction qu'un événement soit partagé par plusieurs stations est plus faible que pour l'autre base environ 16% pour cette base contre environ 23% pour l'autre. Cela veut dire

que nous prévoyons encore moins de liens entre deux stations quand il en existe un.

Dans l'optique de l'analyse plus fine du lien existant entre les stations, la figure 4-14 représente les connexions possibles entre les stations adjacentes qui peuvent donc partager des événements.

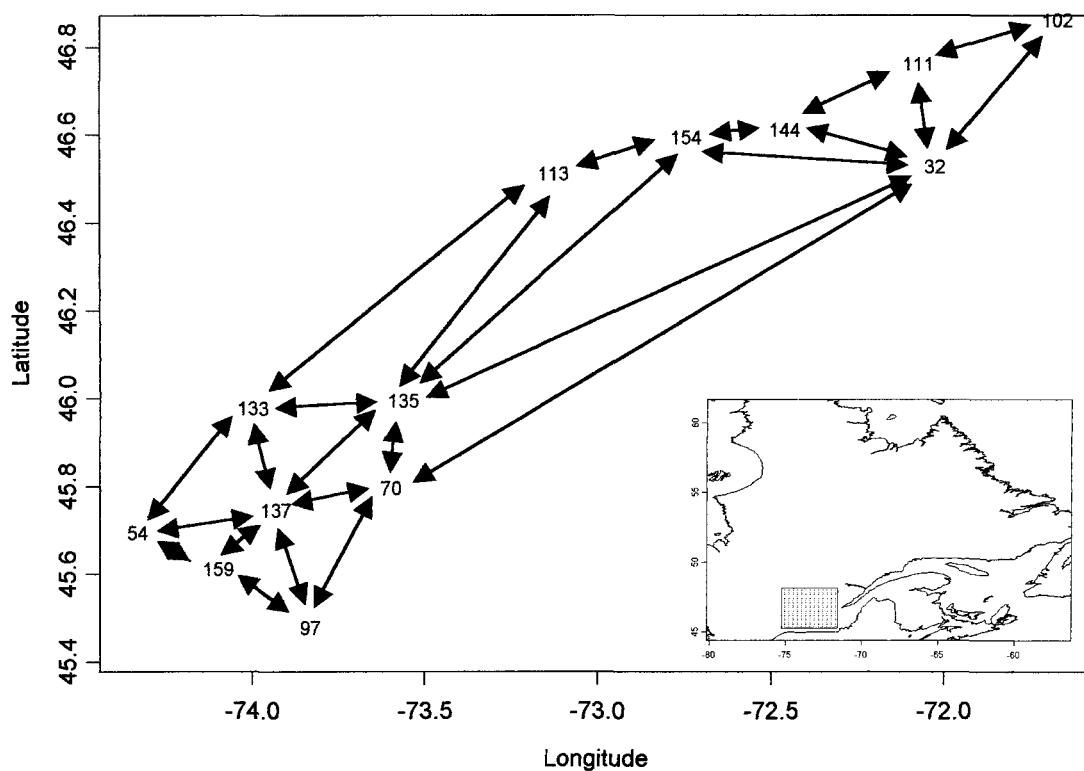


Figure 4-14 : Connexions entre deux stations adjacentes du groupe 1 du réseau de PIM

Le tableau 4-34 nous donne les variables dont les coefficients sont significativement différents de 0 au niveau 5%. Les lignes correspondent à l'indice i tandis que les colonnes correspondent à l'indice j du paramètre π_{ij} . Dans le tableau, les paramètres sont notés D et E pour la durée et l'épaisseur respectivement. L'absence de paramètre pouvant expliquer la probabilité que deux stations partagent le même événement est symbolisée par \emptyset .

↗	32	54	70	97	102	111	113	133	135	137	144	154	159
32			D/E		D/E	D		D	D		E	E	
54										D/E			D
70	D/E			\emptyset					D/E	D			
97			\emptyset							\emptyset			D/E
102	E					E							
111	\emptyset				\emptyset						\emptyset		
113								E	D/E			D/E	
133	D/E						D/E		D/E	D/E			
135	D/E		D/E				D/E	E		D		E	
137		E	D	\emptyset				D	D/E				D
144	E					\emptyset						D	
154	D						D/E		D/E		D/E		
159		D/E		E						D			

Table 4-34 : Paramètres de la régression pour les connexions du groupe 1 du réseau de PIM

Pour les stations situées dans la région de Montréal même, nous pouvons constater que la durée est le paramètre le plus représentatif pour expliquer la probabilité que deux stations partagent le même événement. Pour les stations situées plutôt dans la région de Québec, le paramètre le plus représentatif est l'épaisseur de l'accumulation.

La durée est un paramètre important pour expliquer les probabilités de partage d'événements entre les stations situées sur la région de Montréal par rapport aux résultats de la base de données SYGIVRE et ceci est confirmé par les résultats de la base de données sur les PIM.

Le deuxième groupe de la base de données sur les PIM est situé sur la région allant de Québec au Saguenay / Lac St. Jean.

Les coefficients associés à chaque variable ainsi que les valeurs « t » pour le test $H_0 : \beta_i = 0$ contre $H_1 : \beta_i \neq 0$ associées sont données dans le tableau 4-35 pour le groupe 2.

	Coefficient	Erreur Standard	t value
Constante	-2.9102	0.1944	-14.9692
Durée	1.3023	0.1684	7.7325
Épaisseur	0.0023	0.0031	0.7603

Table 4-35 : Coefficients de la régression des stations du groupe 2 du réseau de PIM

La durée d'un événement est encore le paramètre qui explique le mieux la probabilité que deux stations partagent le même événement pour ce groupement, l'épaisseur n'étant toujours pas représentative.

Le coefficient de corrélation entre les deux variables est donné dans le tableau 4-36 suivant.

	Durée
Épaisseur	0.0146

Table 4-36 : Coefficients de corrélation des stations du groupe 2 du réseau de PIM

Aucune corrélation entre les deux variables n'est encore à noter.

Le tableau 4-37 donne les résultats des prédictions à partir des coefficients déterminés par la régression.

		Prédits	
		0	1
Observés	0	1848	5
	1	419	3

Table 4-37 : Prédictions pour les stations du groupe 2 du réseau de PIM

La prédiction est juste à 81.36%. Le taux de prédiction est identique à celui du groupe de station de la base de données SYGIVRE, seulement, la prédiction effective qu'un événement soit partagé par plusieurs stations est largement moins

bonne, nous avons moins de 1% de bonne prédiction. Par contre, l'erreur de prédiction est moins élevée lorsqu'il n'y a pas de partage d'événements.

Toujours dans l'optique d'une analyse plus fine des liens existants entre les stations, la figure 4-15 représente les connexions possibles entre des stations adjacentes.

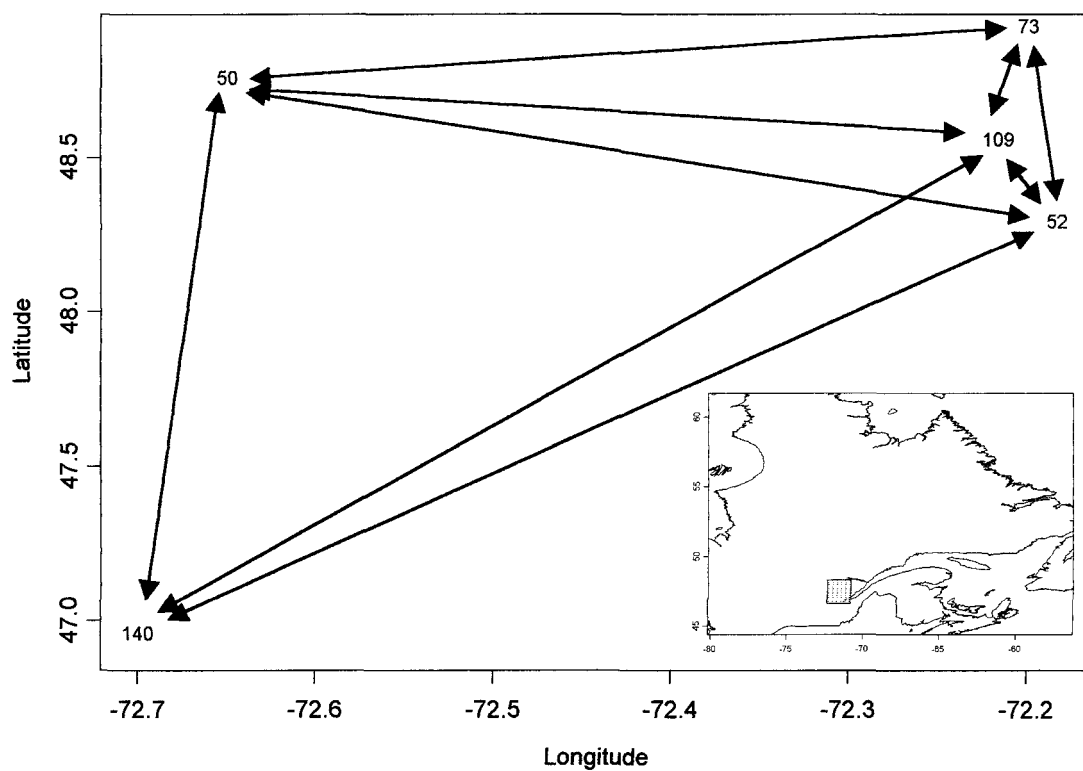


Figure 4-15 : Connexions entre deux stations adjacentes du groupe 2 du réseau de PIM

Le tableau 4-38 nous donne les variables dont les coefficients sont significativement différents de 0 au niveau 5%. Les lignes correspondent à l'indice i tandis que les colonnes correspondent à l'indice j du paramètre π_{ij} . Dans le tableau, les paramètres sont notés D et E pour la durée et l'épaisseur respectivement.

↗	50	52	73	109	140
50		D/E	D	D/E	D/E
52	D		D	D	D
73	D/E	D/E		D/E	
109	E	D/E	E		D
140	D/E	D/E		D/E	

Table 4-38 : Paramètres de la régression pour les connexions du groupe 2 du réseau de PIM

Suivant les stations, les deux paramètres (durée et épaisseur) expliquent la probabilité de partage d'un événement. Nous ne pouvons pas déterminer dans ce cas quel serait celui qui l'explique le mieux.

La température joue un rôle non négligeable pour le groupe de la base de données SYGIVRE. Or, pour la base de données sur les PIM, nous ne l'avons pas ; il est impossible de vérifier si c'est une variable importante pour certains déplacements possibles des événements. La durée est tout de même une variable importante car celle-ci explique bien les probabilités dans les groupes des deux bases de données. L'épaisseur semble jouer un rôle important qui ne se voit pas

dans le groupe de la base de données SYGIVRE par analogie avec le poids. Ceci peut-être dû à la présence de la température qui est plus dominante et donc qui peut avoir plus d'influence que les autres paramètres.

Le troisième groupe de la base de données sur les PIM est situé sur la région de la Côte Nord. Les coefficients associés à chaque variable ainsi que les valeurs « t » pour le test $H_0 : \beta_i = 0$ contre $H_1 : \beta_i \neq 0$ associées sont données dans le tableau 4-39 pour le groupe 3.

	Coefficient	Erreur Standard	t value
Constante	-1.6274	0.3493	-4.6592
Durée	0.1796	0.3137	0.5724
Épaisseur	0.0222	0.0094	2.3487

Table 4-39 : Coefficients de la régression des stations du groupe 3 du réseau de PIM

Pour ce groupement de stations, c'est l'épaisseur qui explique le partage des événements entre les stations, la durée n'est pas concernée.

Le coefficient de corrélation entre les deux variables est donné dans le tableau 4-40.

	Durée
Épaisseur	0.2184

Table 4-40 : Coefficients de corrélation des stations du groupe 3 du réseau de PIM

Une très faible corrélation existe entre les deux variables mais elle n'est pas significative.

Le tableau 4-41 donne les résultats des prédictions à partir des coefficients déterminés par la régression.

		Prédits	
		0	1
Observés	0	540	2
	1	145	1

Table 4-41 : Prédictions pour les stations du groupe 3 du réseau de PIM

La prédiction est juste à 78.63%. Nous pouvons constater de nouveau que le taux de prédiction est identique à celui du groupe de stations de la base de données SYGIVRE, seulement, la prédiction effective qu'un événement soit partagé par plusieurs stations est encore moins bonne (moins de 1% de bonne

prédiction lors d'un partage d'événements entre deux stations). Par contre, l'erreur de prédiction est moins élevée lorsqu'il n'y a pas de partage d'événements.

Toujours dans l'optique d'une analyse plus fine des liens existants entre les stations, la figure 4-16 représente les connexions possibles entre des stations adjacentes.

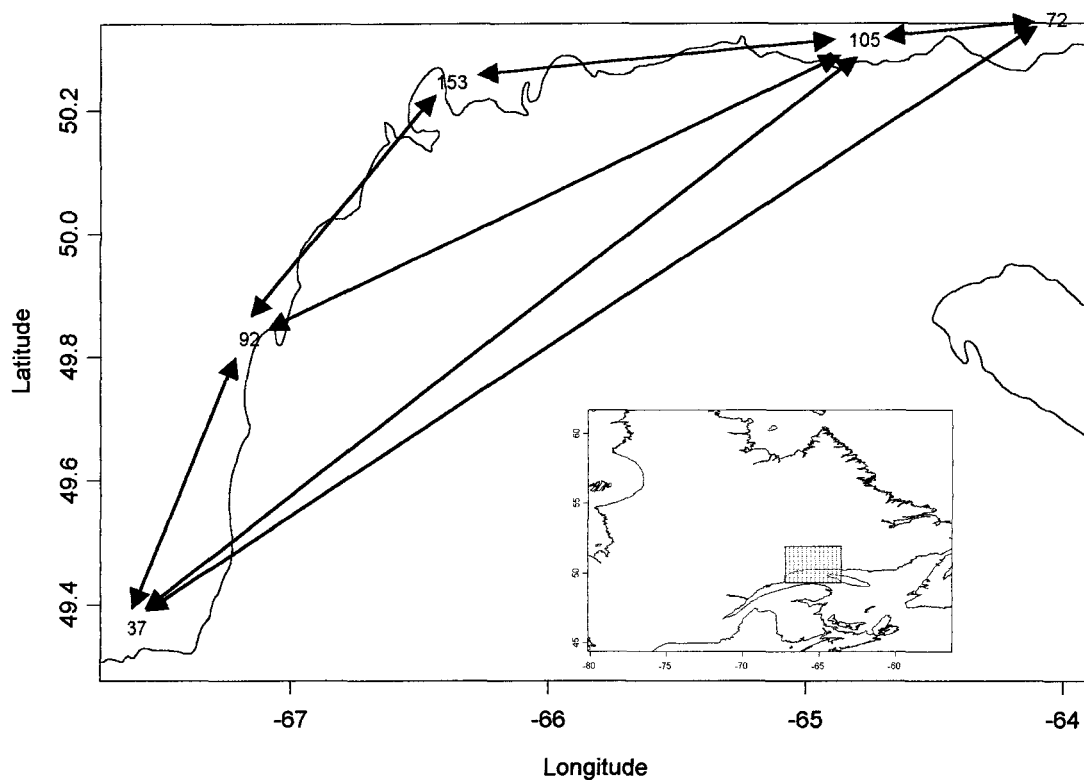


Figure 4-16 : Connexions entre deux stations adjacentes du groupe 3 du réseau de PIM

Le tableau 4-42 nous donne les variables dont les coefficients sont significativement différents de 0 au niveau 5%. Les lignes correspondent à l'indice i tandis que les colonnes correspondent à l'indice j du paramètre π_{ij} . Dans le tableau, les paramètres sont notés D et E pour la durée et l'épaisseur respectivement.

↗	37	72	92	105	153
37		D/E	D/E	E	
72	E			E	
92	D/E			E	D/E
105	D/E	E	D/E		D/E
153			D/E	D/E	

Table 4-42 : Paramètres de la régression pour les connexions du groupe de stations 3 du réseau de PIM

L'épaisseur est le paramètre qui est le plus présent dans la caractérisation des probabilités au contraire de la base de données SYGIVRE qui faisait intervenir la température et la durée.

4.4.3 Discussion

Nous avons vu que, dans la base de données SYGIVRE, la durée est le paramètre qui explique le mieux le groupement des stations pour des événements de givre ou de verglas. Le groupement de stations sans dominance particulière d'un type d'accumulations présente un autre paramètre important qui est la

température. Celle-ci joue un rôle pratiquement aussi important que la durée d'une accumulation.

Nous pouvons donc conclure que la durée est le paramètre qui explique le partage des événements entre les stations. La température doit être prise en compte dans le cas où l'étude porte sur des stations sans dominance de précipitations. Le poids ne joue pas un rôle significatif au niveau de la régression, or, étant donné que le poids est corrélé à la durée pour toutes les régressions, implicitement, il est intégré aux régressions. Cette corrélation était prévisible car plus une tempête (donc une accumulation) dure longtemps, plus le poids augmente.

Ces résultats sont confirmés quand nous étudions la base de données sur les PIM. La durée d'une accumulation est aussi le paramètre important dans la description des groupements des stations, dans le cas des régions situées de Montréal au Saguenay / Lac St. Jean. Pour la région de la Côte Nord, nous constatons que l'épaisseur est le paramètre décrivant le mieux les regroupements. Nous constatons que, par ailleurs, contrairement aux paramètres de la base de données SYGIVRE, il n'y a pas de corrélation entre l'épaisseur et la durée de la tempête pour la base de données sur les PIM.

À partir des régressions, nous avons effectué des prédictions sur les données pour vérifier les résultats. Les comparaisons des prédictions avec les valeurs

réelles montrent une concordance qui varie d'environ 68% à 88%. La prédiction que les événements ne soient pas partagés par plusieurs stations est très bonne et les erreurs sont très faibles. Par contre, pour ce qui est de la prédiction du partage d'événements entre stations (faux négatifs), la prédiction n'est pas bonne.

Par comparaison, les prédictions sur les régressions des bases de données sur les PIM sont pratiquement identiques. En effet, le taux de prédiction est moins bon que pour l'autre base de données sans distinction du type d'accumulation.

4.5 Conclusions

La notion d'événement conjoint permet de recréer les tempêtes de givrage atmosphérique spatialement et temporellement. La définition de la distance entre station est essentielle pour la suite de l'étude. Elle permet de définir des groupements spatiaux en fonction des événements communs à deux stations. En appliquant cette distance aux stations de la base de données SYGIVRE, nous obtenons trois différents groupes de stations géographiquement homogènes et dont celles-ci présentent les mêmes caractéristiques au niveau du type de l'accumulation. Ces groupements sont confirmés par la classification hiérarchique des stations du réseau de PIM.

La régression logistique appliquée aux différents groupements permet de tirer les conclusions suivantes :

La durée d'une accumulation est le paramètre décrivant les probabilités de partage des événements entre les stations. La température ou le poids joue un rôle

pour certaines stations de certaines régions. Dans le cas où les stations n'auraient pas de dominance de type d'accumulation, la température est un paramètre important dans le groupement de celles-ci. C'est une situation normale car le type de l'accumulation est fortement conditionné, dans la réalité, par la température.

Le poids des accumulations étant très corrélé avec la durée de l'accumulation, nous retrouvons parfois une contribution de celui-ci dans certaines régressions, notamment pour la région de la Côte Nord.

Les prédictions, à partir des coefficients de la régression, sont bonnes et oscillent entre 68% et 88%. Les modèles présentent un faible taux de bonne prédiction dans le cas du partage effectif d'un événement entre des stations tandis que le non partage des événements entre les stations est bien prédit.

La présence de nouvelles données permettra de meilleurs ajustements des paramètres de la régression et augmentera donc les prédictions. Les résultats obtenus pour le réseau de PIM montrent qu'il est nécessaire d'avoir plus de variables et une meilleure précision sur les données pour faire une analyse plus fine des événements. Pour y arriver, il faut continuer à implanter des stations.

CHAPITRE 5

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

CHAPITRE 5

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Conclusions générales

Le travail présenté dans ce mémoire permet d'exposer les conclusions suivantes :

En raison de la complexité des données et des bases de données, des outils d'analyses ont été développés afin d'étudier la répartition et la portée des événements de givrage atmosphérique à travers la province de Québec. Nous avons montré que ces outils étaient très utiles pour comprendre le phénomène de précipitation givrante. Les groupements géographiques obtenus à partir de ces outils tiennent compte des microclimats, ce qui est plus utile pour une prédiction à long terme ainsi que pour la construction d'une carte de risques.

Le premier outil est la fonction d'intensité pour un processus de Poisson homogène évaluant la probabilité qu'un événement devant apparaître se produise dans une période donnée. Cet outil donne une caractérisation des stations et

permet de regrouper les années de givrage en classes homogènes quant aux périodes dans la saison qui sont propices aux tempêtes. La fonction d'intensité est donc fonction de la situation géographique des stations et fonction de la rigueur de l'hiver pour une année donnée.

Nous avons observé que la fonction d'intensité était une mesure géographique puisque les stations d'une même région ont des intensités assez semblables. Nous ne pouvons cependant utiliser cette fonction pour établir des groupements spatiaux de stations puisque si deux stations proches géographiquement ont sensiblement la même intensité, cela n'empêche pas non plus deux stations éloignées d'avoir des intensités semblables.

Les saisons de givrage atmosphérique présentent, d'une saison à l'autre, des différences énormes en ce qui concerne la répartition, la fréquence, la durée, ... des événements. Un groupement des années semblables permet de séparer les analyses en parties plus homogènes donc augmente la précision des résultats. À cause d'un nombre insuffisant d'années d'observations, les regroupements des années n'ont pas été exploités. Il est tout de même intéressant de constater que les années communes aux deux réseaux sont identiques du point de vu événements.

Une autre caractéristique de cette fonction est de différencier les types d'accumulations, à savoir verglas ou givre. Les accumulations de verglas et celles de givre ont une répartition différente au cours de la saison de givrage. Pour des accumulations de verglas, nous avons deux fortes périodes, l'une au mois de

décembre et l'autre au mois d'avril tandis que pour celles de givre, une seule forte période se situant au mois de décembre.

Le deuxième outil d'analyse de la base de données est la matrice \mathcal{I}_{ij} qui définit des liens spatiaux et temporels entre les stations. Cette matrice correspond aux probabilités que deux stations partagent un même événement et elle est définie à partir des données d'événements de givrage atmosphérique. Cette matrice, que nous transformons en distance, permet d'analyser les groupements de stations en termes de partage de tempêtes de verglas ou de givre.

Dans le cadre du réseau SYGIVRE, cette matrice de similitudes entre stations permet de définir des groupements ayant un sens géographique plus réaliste que les simples distances géographiques qui ne tiennent pas compte des topographies et des microclimats. La technique ne peut cependant pas être utilisée si la précision des mesures n'est pas assez bonne, comme dans le cas des données du réseau de PIM. Les résultats montrent trois grands groupes de stations. Le premier est situé sur la région de Montréal et comporte des stations à dominance d'événements de verglas ; le second sur la région de Québec avec des stations sans dominance de type d'événements et le troisième est situé sur la région de la Côte Nord, avec des stations à dominance d'événements de givre.

Dans le but d'établir une relation entre les groupements spatiaux et des variables exogènes, nous proposons l'utilisation de la régression logistique pour

expliquer les relations π_{ij} entre les stations d'un même groupe. Les résultats montrent que la durée et le poids des accumulations de givrage atmosphérique font parti des variables qui expliquent le mieux la propagation des événements de givrage atmosphérique à travers la province de Québec pour la base de données SYGIVRE.

La durée de l'accumulation est clairement le paramètre essentiel dans la description des probabilités de partage des événements entre les stations lorsque nous considérons seulement les paramètres durée, température et poids d'un événement. Par la suite, selon différentes configurations, notamment en fonction du type de l'accumulation prépondérant à chaque station, la température et le poids expliquent un peu la probabilité de partage des événements entre les stations. Une corrélation très forte existe entre le poids de l'accumulation et sa durée. C'est une situation normale quand on sait que plus l'accumulation dure longtemps, plus l'accumulation sera grande.

Les prédictions à partir des données d'étude et des paramètres des régressions donnent de bons résultats en considérant la prédiction globale. En effet, ceux-ci s'échelonnent de 68% à 88% de bonnes prévisions en fonction du type des événements et des régions. Globalement, la prédiction pour des événements de givre est meilleure que celle pour des événements de verglas pour toutes les régions. Par contre, les modèles présentent un faible taux de bonnes prédictions dans le cas d'un partage d'événements entre deux stations.

La méthode développée dans ce présent mémoire donne des résultats intéressants pour ce qui est de la caractérisation de la progression des événements à travers un maillage de stations. La matrice de probabilité définie nous donne les probabilités qu'une station appartienne à un groupe et donc qu'un événement apparaissant à une station se retrouve à une autre station par la même occasion.

En intégrant d'autres données dans les années à venir, il sera d'autant plus intéressant d'étudier les nouveaux résultats car les différentes probabilités et regroupements en seront améliorés par cette augmentation du nombre de données.

La recherche a porté sur l'étude des événements de givrage atmosphérique conditionnels (les événements se sont déclarés). Le but de cette étude était d'étudier leur progression. La suite de cette recherche est de :

- trouver des paramètres d'alerte pour une tempête qui débute ;
- trouver des variables qui devraient mieux intégrer les « faux négatifs » comme l'humidité, la vitesse du vent, etc. ;
- utiliser les groupes de stations pour faire une analyse de risques.

Recommandations

La présente analyse donne des outils et une démarche d'analyse des événements de givrage atmosphérique. Celle-ci s'est effectuée avec une jeune base de données (SYGIVRE). Au cours des prochaines années, les données ne cesseront de venir se rajouter à la présente base de données et l'intégration de ces nouvelles données permettront d'améliorer les résultats ici présents.

La précision des données est très importante dans les classifications hiérarchiques, comme nous avons pu le constater. Il est donc nécessaire de conserver une bonne précision sur la base de données SYGIVRE, notamment en ce qui concerne les mesures de la température. La base de données sur les PIM, même si elle n'est présente qu'à titre de validation doit avoir des mesures plus précises et bien enregistrées (enregistrement aux 6 heures avec indication de l'heure exacte de la prise de mesures, par exemple)

Il sera intéressant de faire les analyses en fonction de groupements de saisons mais aussi en fonction de groupes de stations, définis par les classifications hiérarchiques.

Il faut compléter le modèle en intégrant des interactions entre les variables pour expliquer les propagations de tempêtes entre les stations.

Il s'avère nécessaire de trouver d'autres formes de régressions plus appropriées (par exemple polynomiale, exponentielle, ...) afin d'augmenter les pourcentages concernant la prédiction d'un partage réel d'événements entre des stations.

L'utilisation d'une base de données extérieures pour valider les résultats présents pourra être faite. Cette base de données peut provenir d'Environnement Canada qui a aussi un réseau de stations de mesures météorologiques réparties dans la province de Québec.

RÉFÉRENCES

- [1] Chaîné P.M. et Castonguay G.. «Une nouvelle approche de la notion d'épaisseur radiale de la glace appliquée à des conducteurs tu type en faisceaux». *Météorologie Industrielle – Étude IV*, Environnement Canada. Toronto, 1974.
- [2] Chaîné P.M., Verge R.W., Castonguay G. et Gapiéry J.. «Chargement dû au vent et au verglas au Canada». *Météorologie Industrielle – Étude II*, Environnement Canada. Toronto, 1974.
- [3] Chouinard L.E., ElFashny K., Nguyen V.T.V. et Laflamme J.. «Modeling of Icing Events Based on Passive Ice Meter Observations in Quebec». *Atmospheric Research* 46, Elsevier, 1998, pp.169-179.
- [4] Claffey K., Jones K.F. et Ryerson C.C.. «Use and Calibration of Rosemount Ice Detectors for Meteorological Research». ». *Sixth International Workshop on the Atmospheric Icing of Structures*. Budapest, Hongrie, 1993, pp.105-108.
- [5] Devroye L.. «A course in density estimation». Birkhäuser Verlag. Boston, États-Unis, 1987.
- [6] Dillon W.R. et Goldstein M.. «Multivariate Analysis – Methods and Applications». John Wiley & Sons, New York, États-Unis, 1984.
- [7] Druez J. et McComber P.. «Correlation Between the Data of an Ice Detector and the Mass of Ice Accreted on Different Conductors». *Eighth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*. Reykjavik, Islande, 1998, pp.121-126.

- [8] Druez J., McComber P. et Farzaneh M.. «Analysis of Atmospheric Icing Events Observed at the Mount Valin Test Site During the 1995-96 Season». Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference. Brest, France, 1999, pp.574-580.
- [9] ElFashny K.N.G., Chouinard L.E., Nguyen V.T.V. et Laflamme J.N.. «Characteristics of Icing Events in Quebec». Eighth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Reykjavik, Islande, 1998, pp.537-542.
- [10] Eliasson A.J. et Thorsteins E.. «Data Analysis of Icing Measurements in Iceland». Sixth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Budapest, Hongrie, 1993.
- [11] Farzaneh M. et Drapeau J.F.. «AC Flashover Performance of Insulators Covered with Artificial Ice». IEEE Transactions on Power Delivery.1995.
- [12] Farzaneh M. et Kiernicki J.. «Flashover Problems Caused by Ice Build-up on Insulators». IEEE Electrical Insulation Magazine. Invited Paper, Vol. 11, No. 2. mars 1995, pp.5-17.
- [13] Farzaneh M. et Savadjiev K.. «Icing Events Occurrence in Quebec: Statistical Analysis of Field Data». Proceedings of 8th International Offshore and Polar Engineering. Montréal (QC), Canada, 1998.
- [14] Felin B.. «Ten years of standardized field ice accretion measurements in Quebec». Third International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Vancouver (B.C.), Canada, 1986

- [15] Felin B.. «Pluie verglaçante au Québec : observations naturelles comparées aux estimations d'un modèle». Fourth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Paris, France, 1988
- [16] Goodwin E.J., Mozer J.D., DiGioia A.M. et Power B.A.. «Predicting Ice and Snow Loads for Transmission Line Design». First International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Hanover (NH), États-Unis, 1982, pp.267-273.
- [17] Haldar A., Pon C., McComber P., Marshall M.A., Ishac M., Goel A. et Kastelein M.. «Validation of Ice Accretion Models for Freezing Precipitation Using Field Data». Seventh International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Chicoutimi (QC), Canada, 1996.
- [18] Hartigan J.A.. «Clustering Algorithms». John Wiley & Sons, New York, États-Unis, 1975.
- [19] Havard D.G. et Pon C.J.. «Analysis of galloping conductor field data». Ninth International Workshop on Atmospheric of Structures. Reykjavik, Islande, 1998.
- [20] Houde L., Guesdon C., Farzaneh M. et Chouinard L.. «Analysis of Spatial Patterns for Icing Events in Quebec». Ninth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Chester, Royaume-Uni, 2000.
- [21] Hydro-Québec. «Manuel d'observation du givre et du verglas – Programme d'observation glacimétrique». Division équipement de lignes, Services études et normalisation. 8^{ième} édition, 1993.

- [22] Hydro-Québec. «Givromètre : Fiche technique pour système de mesure de verglas».
- [23] Hydro-Québec. «Réponses aux questions de la Commission scientifique et technique chargée d'analyser les événements relatifs à la tempête de verglas survenue du 5 au 9 janvier 1998».
<http://www.hydroquebec.com/publications/reponses/index.html>
- [24] Isaksson S.P., Eliasson A.J. et Thorsteins E.. «Icing Database, Acquisition and Registration of Data». Eighth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Reykjavik, Islande, 1998, pp.235-240.
- [25] Jones K. F.. «The Effect of Horizontal and Torsional Coupling on Vertical Galloping». Sixth International Workshop on the Atmospheric Icing of Structures. Budapest, Hongrie, 1993, pp.143-148.
- [26] Kaufman L. et Rousseeuw P.J.. «Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis». J. Wiley, New York, États-Unis, 1990.
- [27] Kiesling F. et Ruhnau J.. «Ice Loads on Overhead Power Lines in Germany and their Impact on Reliability and Design». Sixth International Workshop on the Atmospheric Icing of Structures. Budapest, Hongrie, 1993, pp.127-132.
- [28] Laflamme J.. «Icing Rate Measurements : A Key Way of Estimating Ice Loads on Structures». Seventh International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Chicoutimi (QC), Canada, 1996, pp.175-180.

- [29] Laflamme J.. «Spatial Variation of Extreme Values in the Case of Freezing Rain Icing». Sixth International Workshop on the Atmospheric Icing of Structures. Budapest, Hongrie, 1993, pp.19-23.
- [30] Laflamme J.. «Sites de mesure du givrage atmosphérique». Carte, Hydro-Québec, septembre 1998.
- [31] Laflamme J.. «Nouveaux sites proposés et limites de sous-ensembles géographiquement homogènes ; Sites de mesure du givrage atmosphérique». Carte, Hydro-Québec, décembre 1998.
- [32] Laflamme J.. «Space and Time Estimates Ice Loads from two Interactive Networks of Ice Accretion Measurements Sites». International Seminar on Ice Load Measurements. Norway, 1992.
- [33] Laflamme J.. «Spatial Distribution of Ice Accretion within Icing Storms and within Transmission Lines Routes». International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Tokyo, Japon, 1990.
- [34] Laflamme J. et Périard G.. «The Climate of freezing Rain over the Province of Quebec in Canada : A Preliminary Analysis». Seventh International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Chicoutimi (QC), Canada, 1996.
- [35] Laforte J.L., Allaire M.A. et Laflamme J.. «Wind Tunnel Evaluation of the Hydro-Quebec Rime Meter using a Rosemount Sensor». Sixth International Workshop on the Atmospheric Icing of Structures. Budapest, Hongrie, 1993, pp.109-114.

- [36] Lu M.L., Olivier P., Popplewell N. et Shah A.H.. «Predicting Extreme Loads on a Power Line from Freezing Rainstorms». Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference. Brest, France, 1999, pp.594-598.
- [37] MathSoft. «S-PLUS 2000 Guide to statistics, Volume 1». Data Analysis Products Division. Seattle (WA), États-Unis, 1999.
- [38] MathSoft. «S-PLUS 2000 Guide to statistics, Volume 2». Data Analysis Products Division. Seattle (WA), États-Unis, 1999.
- [39] MathSoft. «S-PLUS 2000 User's Guide». Data Analysis Products Division. Seattle (WA), États-Unis, 1999.
- [40] McComber P., Druez J. et Laflamme J.. «A Comparison of Selected Models for Estimating Cable Icing». Sixth International Workshop on the Atmospheric Icing of Structures. Budapest, Hongrie, 1993, pp.41-46.
- [41] McComber P., Latour A., Druez J. et Laflamme J.. «The icing rate meter, an instrument to evaluate transmission line icing». Seventh International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Chicoutimi (QC), Canada, 1996, pp.159-168.
- [42] McCormick T. et Pohlman J. C.. «Study of Compact 220 kV Line System Indicates Need for Micro Scale Meteorological Information». Sixth International Workshop on the Atmospheric Icing of Structures. Budapest, Hongrie, 1993, pp.155-160.
- [43] Poots G.. «Ice and Snow Accretion on Structures». J. Wiley, New York, États-Unis, 1996.

- [44] Reyerson C. et Eliasson A.J.. «Ice Detector Prediction of Transmission Line Ice Loads in Northwestern Iceland». Sixth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Budapest, Hongrie, 1993.
- [45] Saporta G.. « Probabilité, Analyse des données et statistique ». Éditions Technip. Paris, 1990.
- [46] Savadjiev K. et Farzaneh, M.. «Analysis and Interpretation of Icing Rate Meter and Load Cell Measurements on the Mt. Bélair Icing Site». Proceedings of 9th International Offshore and Polar Engineering. Brest, France, pp.607-611, 1999.
- [47] Savadjiev K. et Farzaneh M.. «Statistical Analysis of Two Probabilistic Models of Ice Accretion on Overhead Line Conductors». Proceedings of 8th International Offshore and Polar Engineering. Montréal (QC), Canada, 1998.
- [48] Savadjiev K., Farzaneh M., Druez J., McComber P. et Paradis A.. «Analysis and Interpretation of Icing Rate Meter and Load Cell Measurements on the Mt. Belair Icing Site». Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference. Brest, France, 1999, pp.607-611.
- [49] Savadjiev K., Latour A. et Paradis A.. «Estimation of Ice Accretion Weight from Field Data Obtained on Overhead Transmission Line Cables». Seventh International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Chicoutimi (QC), Canada, 1996, pp.125-130.

- [50] Shan L., Marr L. et McCafferty R.M.. «Ice Storm Data Base and Ice Severity Map». Seventh International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Chicoutimi (QC), Canada, 1996, pp.3-7.
- [51] Silverman B.W.. «Density Estimation for Statistics and Data Analysis». Chapman & Hall/CRC, Londres, 1998.
- [52] Snæbjörnsson J.P et Sigbjörnsson R.. «Probabilistic Modeling of Ice and Wind Effects on Electric Transmission Line Structures». Eighth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. Reykjavik, Islande, 1998, pp.21-26.
- [53] Stein P.. «Rosemount Freezing Rain Sensor». Sixth International Workshop on the Atmospheric Icing of Structures. Budapest, Hongrie, 1993, pp.121-124.
- [54] Stoyan D. et Stoyan H.. «Fractals, Random Shapes and Point Fields : Methods of Geometrical Statistics». J. Wiley, New York, États-Unis, 1994.
- [55] TransÉnergie. «Réseau des sites de mesure SYGIVRE». Carte, Hydro-Québec, novembre 1999.