

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE  
M.Eng.

PAR  
COMEAU, Monelle

LA CARACTÉRISATION DU CLIMAT GIVRANT DE SITES ÉOLIENS : MESURE,  
ANALYSE DE MODÈLES ET CARTOGRAPHIE DU GIVRAGE ATMOSPHÉRIQUE

MONTREAL, LE 11 AOÛT 2008

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Christian Masson, Directeur de thèse  
Département de génie mécanique, École de technologie supérieure

M. François Morency, Codirecteur  
Département de génie mécanique, École de technologie supérieure

M. Robert Leconte, Président du jury  
Département de génie civil, École de technologie supérieure

Mme Anna Glazer, Examinatrice externe  
Recherche en prévision numérique, Service météorologique du Canada

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 27 JUIN 2008

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## REMERCIEMENTS

Effectuer une maîtrise a été pour moi une expérience d'apprentissage enrichissante, stimulante et pleine de défis motivants, et ce, grâce à l'aide, l'appui, et les conseils de plusieurs personnes.

Je souhaite en premier remercier profondément les deux personnes qui m'ont le plus guidée dans mon travail : Christian Masson, mon directeur, François Morency, mon codirecteur. Chacun à leur manière, et de façon très complémentaire, ils m'ont permis d'évoluer dans mon travail et dans ma démarche scientifique. Je suis aussi très reconnaissant envers Francis Pelletier, la personne ressource pour mon projet chez le partenaire industriel Hélimax Énergie inc., pour ses nombreux conseils et son soutien constant.

Ensuite, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers Guy Fortin, John Maissan et Anna Glazer, qui, par leur expertise sur le givrage atmosphérique, m'ont grandement aidée.

Le banc d'essai conçu pendant ma maîtrise m'a amené à travailler avec plusieurs personnes au sein de l'École de technologie supérieure (ÉTS), et chez le partenaire industriel Hélimax Énergie inc.. Je dois des remerciements à Alexandre Vigneault et à Olivier Charette, de l'ÉTS, pour leur contribution au projet de banc d'essai. Chez Hélimax Énergie, je tiens à remercier Shant Dokouzian pour sa patience et pour son travail considérable, ainsi que Pierre Héraud, Jean-François Dolbec, Caroline Lamontagne et Gregor Probst.

En outre, je tiens à remercier Nicolas et ma famille pour leur amour, leur soutien constant et leurs conseils judicieux, de même que mes collègues et mes amis pour leurs encouragements et les moments agréables passés ensemble.

En terminant, je tiens à souligner la contribution financière du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie et de la Fondation Baxter & Alma Richard.

# **LA CARACTÉRISATION DU CLIMAT GIVRANT DE SITES ÉOLIENS : MESURE, ANALYSE DE MODÈLES ET CARTOGRAPHIE DU GIVRAGE ATMOSPHÉRIQUE**

COMEAU, Monelle

## **RÉSUMÉ**

De plus en plus, des éoliennes sont installées en climats froids, climats propices au givrage atmosphérique. Caractériser le climat givrant d'un site peut donc s'avérer une étape utile dans la planification d'un parc éolien, mais elle comporte plusieurs défis.

L'un d'eux est la mesure du givrage atmosphérique. Il existe plusieurs instruments et méthodes pour le mesurer, mais la fiabilité de ceux-ci n'est pas toujours connue ou documentée. Pour étudier toutes les problématiques reliées à la mesure du givrage atmosphérique, un banc d'essai a été conçu et installé à Baie-des-Sables. Ce banc d'essai comprend deux instruments de détection du givrage atmosphérique et une variété d'autres instruments qui peuvent servir à identifier des conditions propices au givrage atmosphérique. Le banc d'essai permettra d'évaluer la durée, l'intensité, la persistance et le type de givrage atmosphérique de diverses manières.

Un autre défi est la modélisation des périodes de givrage atmosphérique. La modélisation est utile parce qu'il n'est pas toujours possible d'avoir accès à des données sur le givrage atmosphérique. Il existe plusieurs modèles qui permettent d'estimer les périodes de givrage atmosphérique à partir de données météorologiques standard. Toutefois, la performance de ces modèles n'est pas toujours bien connue. Une partie du mémoire est dédiée à mettre en place une méthodologie d'évaluation quantitative de modèles simples d'estimation des périodes de givrage atmosphérique. Ensuite, ces modèles sont appliqués à des données numériques de réanalyse, et les résultats sont comparés à des observations de givrage atmosphérique à six aéroports. Cette comparaison permet de comprendre les forces et les faiblesses de ces différents modèles. Le modèle utilisant la température et l'humidité relative permet d'établir une certaine corrélation entre le nombre d'heures de givrage atmosphérique prédit et observé annuellement, alors que celui utilisant la température et une prévision de pluie verglaçante indique la meilleure correspondance dans le temps entre les événements prédits et observés.

Le modèle de température et d'humidité relative est exploité pour tracer une carte du givrage atmosphérique pour la partie sud du Québec. Même si la marge d'erreur associée à la prédiction d'heures de givrage atmosphérique est importante, cette carte peut être une estimation valable pour les régions où il n'existe pas de données sur le givrage atmosphérique.

Finalement, les résultats du mémoire démontrent qu'une bonne modélisation des périodes de givrage atmosphérique pour le domaine de l'énergie éolienne nécessite des recherches plus poussées.

**Mots-clés :** énergie éolienne, givrage atmosphérique, modèles de prédiction, données de ré-analyse, données d'aéroports, carte de givrage

# **CHARACTERIZING THE ICING CLIMATES OF WIND TURBINE SITES: MEASUREMENTS, MODEL ANALYSIS AND MAPPING OF ATMOSPHERIC ICING**

COMEAU, Monelle

## **ABSTRACT**

More and more wind turbines are being installed in cold climates where atmospheric icing is to be expected. Characterizing the icing climate of a site is therefore a useful step in the planning procedure of a wind turbine park, but it remains a challenging task.

One of the challenges related to defining the icing climate of a site is the measurement of atmospheric icing itself. Many measuring methods and instruments exist, but none of these is entirely reliable. A measuring station dedicated to this phenomenon has thus been designed and installed at Baie-des-Sables. It includes two instruments to detect icing as well as many other instruments to identify atmospheric icing conditions. The experimental set-up will be used in different ways to evaluate atmospheric icing duration, persistence, intensity and type.

Another challenge is the modelling of atmospheric icing periods. Modelling is useful because it is not always possible to access adequate icing data. There are currently several models that estimate atmospheric icing duration from standard meteorological data. Their performance, however, is not always well known. A part of this master's thesis is dedicated to developing a quantitative evaluation methodology to evaluate a few simple atmospheric icing models. The models were applied to numerical reanalysis data and the results were compared to icing data from six airports. This comparison allows a better understanding of the strengths and weaknesses of the different models. Of these, the models using temperature and relative humidity provide a certain correlation between the annual number of observed and predicted icing hours, and the model using temperature and freezing rain forecasts shows the best correspondence in time between the observed and predicted icing events.

The temperature and relative humidity model is utilized to map the icing climate of southern Québec. Although the error margin associated with the atmospheric icing prediction is important, this map can provide a valuable estimate for regions where no icing data is available.

Finally, the results of the research show that a good modelling of atmospheric icing events for the wind energy industry requires further research.

**Keywords :** wind energy, atmospheric icing, prediction models, reanalysis data, airport data, icing map



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION . . . . .	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE . . . . .	4
1.1 Givrage atmosphérique . . . . .	4
1.1.1 Processus de formation du givre et du verglas . . . . .	6
1.1.1.1 Effet de la température de l'air . . . . .	9
1.1.1.2 Effet du diamètre des gouttelettes . . . . .	10
1.1.1.3 Effet de la vitesse du vent . . . . .	11
1.1.1.4 Effet de la teneur en eau liquide . . . . .	12
1.1.1.5 Autres influences . . . . .	12
1.1.2 Processus de formation de la neige mouillée et de la gelée blanche . .	12
1.1.3 Caractéristiques spatiales et temporelles du givrage atmosphérique . .	13
1.2 Caractérisation du climat givrant d'un site . . . . .	15
1.2.1 Ressources existantes pour la caractérisation du climat givrant . . . .	18
1.2.1.1 Atlas du givrage atmosphérique . . . . .	18
1.2.1.2 Données sur le givrage atmosphérique . . . . .	18
1.2.2 Problématiques de la caractérisation du climat givrant . . . . .	19
1.2.2.1 Mesure du givrage atmosphérique . . . . .	19
1.2.2.2 Modélisation du givrage atmosphérique . . . . .	20
1.3 Modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique . . . . .	21
1.3.1 Données des modèles de PNT . . . . .	21
1.3.2 Modèles d'estimation des périodes de givrage atmosphérique . . . . .	21
1.3.2.1 Humidité relative . . . . .	22
1.3.2.2 Humidité relative et radiation solaire . . . . .	23
1.3.2.3 Hauteur des nuages, visibilité et nébulosité . . . . .	24
1.3.2.4 Teneur en eau liquide et teneur en eau surfondue . . . . .	25
1.3.2.5 Précipitations . . . . .	26
1.3.3 Bilan des modèles d'estimation des périodes de givrage atmosphérique	26
1.4 Données météorologiques disponibles au Québec . . . . .	27
1.4.1 Stations météo d'Environnement Canada . . . . .	27
1.4.2 Stations météo d'Environnement Canada et de Nav Canada . . . . .	28
1.4.3 Données de radiosondes . . . . .	28
1.4.4 Données d'analyse d'Environnement Canada . . . . .	29
1.4.5 Données de réanalyse du « National Centre for Environmental Predic- tion » . . . . .	30
1.4.6 Autres données numériques . . . . .	31
1.4.7 Bilan sur les données disponibles . . . . .	31
1.5 Bilan . . . . .	32

CHAPITRE 2	CONCEPTION D'UN BANC D'ESSAI	34
2.1	Mesure et détection du givrage atmosphérique	34
2.1.1	Instruments de mesure et de détection	34
2.1.1.1	Instruments de mesure automatisés	35
2.1.1.2	Instruments de mesure passifs	41
2.1.1.3	Comparaisons des instruments	43
2.1.2	Méthodes indirectes de mesure et de détection du givrage atmosphérique	44
2.1.2.1	Différence entre anémomètres chauffés et non chauffés	44
2.1.2.2	Variation des écarts-types	45
2.1.2.3	Comparaisons des méthodes indirectes	45
2.1.3	Bilan sur la mesure et la détection	46
2.2	Instrumentation du banc d'essai	47
2.2.1	Instruments de mesure et de détection directs	48
2.2.2	Instruments pour méthodes de mesure et de détection indirectes	49
2.2.2.1	Différence entre anémomètres chauffés et non chauffés	49
2.2.2.2	Variation des écarts-types	50
2.2.2.3	Température et humidité relative	50
2.2.2.4	Température, humidité relative et radiation solaire	50
2.2.2.5	Température et précipitations	50
2.2.3	Autres instruments et accessoires	50
2.3	Disposition des instruments	51
2.3.1	Norme 61400-12-1	51
2.3.2	Emplacement des instruments	52
CHAPITRE 3	MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES MODÈLES DE PRÉDICTI- TION DES ÉVÉNEMENTS DE GIVRAGE ATMOSPHÉRIQUE	57
3.1	Description des données	57
3.1.1	RRAN	57
3.1.2	METAR	59
3.1.2.1	Aéroports choisis	59
3.1.2.2	Format METAR	61
3.1.2.3	Détection du givrage atmosphérique	62
3.1.2.4	Incertitude sur les données	63
3.1.2.5	Résumé pour les données METAR	64
3.2	Traitement préliminaire des données	64
3.2.1	Traitements temporels	65
3.2.2	Traitements spatiaux	65
3.2.3	Calcul de la teneur en eau liquide	67
3.2.4	Données manquantes	68
3.3	Méthodologie	69
3.3.1	Indices de performance	69
3.3.2	Modèles à évaluer	72
3.4	Bilan	74

CHAPITRE 4	RÉSULTATS DE L'ANALYSE DES MODÈLES DE PRÉDICTION DES PÉRIODES DE GIVRAGE ATMOSPHERIQUE . . . . .	75
4.1	Premiers résultats . . . . .	75
4.1.1	Résultats globaux . . . . .	75
4.1.2	Résultats par station et sensibilité des modèles . . . . .	77
4.2	Résumé des résultats . . . . .	79
4.3	Deuxièmes résultats . . . . .	81
4.4	Bilan . . . . .	83
CHAPITRE 5	APPLICATION D'UN MODÈLE D'ESTIMATION DES HEURES DE GIVRAGE ATMOSPHERIQUE . . . . .	84
5.1	Application du modèle $T, HR \geq 92\%$ . . . . .	84
5.1.1	Intervalle de prédiction . . . . .	86
5.1.2	Application du modèle . . . . .	86
5.2	Présentation de la carte . . . . .	87
5.2.1	Cartes existantes . . . . .	87
5.2.2	Autres sites . . . . .	90
5.2.2.1	Murdochville . . . . .	90
5.2.2.2	Mont Valin . . . . .	91
5.2.2.3	New Richmond . . . . .	92
5.2.2.4	Mirabel . . . . .	93
5.3	Bilan . . . . .	94
CONCLUSION	. . . . .	95
RECOMMANDATIONS	. . . . .	103
ANNEXE I	LES ATLAS DE GIVRAGE ATMOSPHERIQUE PUBLICS POUR LE CANADA OU LE QUÉBEC . . . . .	104
ANNEXE II	VARIABLES DE LA RRAN . . . . .	110
ANNEXE III	ANALYSE SUR LA LIMITE À UTILISER POUR LA VALEUR PONDÉRÉE DE LA PRÉVISION DE PLUIE VERGLAÇANTE . . . . .	121
ANNEXE IV	TEST D'HYPOTHÈSE « T-TEST » . . . . .	122
BIBLIOGRAPHIE	. . . . .	124

## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1 Propriétés des différents types de givrage atmosphérique (Tiré de Minsk, 1980; Organisation internationale de normalisation, 2000; Ross, 2002)	5
Tableau 2.1 Les instruments et méthodes indirectes de mesure et de détection du givrage atmosphérique et les caractéristiques du givrage atmosphérique qu'ils permettent de mesurer ou d'estimer (T : température de l'air, HR : humidité relative, RS : radiation solaire, HN : hauteur des nuages, VIS : visibilité, TEL : teneur en eau liquide, TES : teneur en eau surfondue, PRÉ : précipitations)	47
Tableau 2.2 Informations sommaires sur les instruments du banc d'essai	56
Tableau 3.1 Codification des différents phénomènes de givrage atmosphérique. (Tiré de Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, 2005 [traduction libre])	62
Tableau 3.2 Nombre d'événements de givrage atmosphérique par station, par année et par type	63
Tableau 3.3 Longitude, latitude et élévation des aéroports et des points de maille de la RRAN utilisés	68
Tableau 3.4 Table de contingence	70
Tableau 3.5 Variation des limites des paramètres météorologiques	73
Tableau 4.1 Résultats pour un $\overline{CSI}$ maximum	76
Tableau 4.2 Résultats pour un $R^2$ maximum	76
Tableau 4.3 Résultats pour un $\overline{CSI}$ maximum (2 <sup>ième</sup> analyse)	82
Tableau 4.4 Résultats pour un $R^2$ maximum (2 <sup>ième</sup> analyse)	82



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 <i>Verglas, givre, gelée blanche et neige mouillée.</i> (Tirées de Clark, 2006; Daily et Daily, 2006; Maissan et Love, 2004; Oklahoma Climatological Survey, 2006) . . . . .	6
Figure 1.2 <i>Illustration de la formation de nuage par montée forcée d'air.</i> (Tirée de Klock et al., 2001) . . . . .	7
Figure 1.3 <i>Illustration de la formation de nuages par la rencontre d'un front froid et d'un front chaud.</i> (Tirée de Klock et al., 2001) . . . . .	8
Figure 1.4 <i>À gauche, la schématisation de l'accrétion de givre, et à droite, la schématisation de l'accrétion de verglas.</i> (Tirées de Makkonen, 2000 [traduction libre]) . . . . .	9
Figure 1.5 <i>Illustration de l'effet du diamètre des gouttelettes sur la captation.</i> (Tirée de Makkonen, 2000 [traduction libre]) . . . . .	10
Figure 1.6 <i>Relation entre les conditions atmosphériques et le type de givrage pour deux sites au Japon.</i> (Tirée de McKay et Thomson, 1969 [traduction libre]) . . .	11
Figure 1.7 <i>Photo d'un nuage de givre sur Grey Mountain.</i> (Photo de John Maissan, 2006) . . . . .	15
Figure 1.8 <i>Schéma pour la caractérisation du climat givrant d'un site éolien.</i> (Tiré de Tamelin et al., 2005 [traduction libre]) . . . . .	17
Figure 1.9 <i>Exemple de données METAR.</i> (Tirée de Nav Canada, 2008) . . . . .	29
Figure 2.1 <i>Instruments B.F. Goodrich pour applications au sol (modèle 0872E3 à gauche et modèle 0871LH1 à droite).</i> (Tirés de Goodrich Corporation, 2002a,b) . .	36
Figure 2.2 <i>Illustration de l'instrument B.F. Goodrich modifié.</i> (Tirée de Fikke et al., 2005) . . . . .	37
Figure 2.3 <i>Instruments Labko.</i> (Tirés de Fikke et al., 2005; Wavin-Labko, 2006) . . .	38
Figure 2.4 <i>À gauche, le METEO, au milieu le Icemeter et à droite, le IceMonitor.</i> (Tirées de Cattin et al., 2007; Chum et Vojta, 2005; EGÚ Brno, 2006) . . . . .	40
Figure 2.5 <i>Instruments de HoloOptics.</i> (Tirée de Fikke et al., 2007) . . . . .	41

Figure 2.6	<i>Instrument passif PIM d'Hydro-Québec. (Tiré de Yang, 2005)</i>	42
Figure 2.7	<i>Comparaison entre différents instruments de détection du givrage atmosphérique (le FD12P, un capteur de temps, n'est pas décrit dans ce chapitre car sa fonction n'est pas de détecter le givrage atmosphérique). (Tiré de Sääntti et al., 2003 [traduction libre])</i>	43
Figure 2.8	<i>Comparaison entre méthodes de détection de givrage atmosphérique (HR : humidité relative élevée, LID : Instrument Labko Ice Detector, Pluie : mesure de précipitations, Erreur NC/C : erreur entre l'anémomètre chauffé et non chauffé). (Tiré de Laakso et al., 2003a [traduction libre])</i>	46
Figure 2.9	<i>Shéma de la section principale du banc d'essai. (Croquis d'Alexandre Vigneault de l'École de technologie supérieure, 2008)</i>	53
Figure 2.10	<i>Shéma d'une section du banc d'essai. (Croquis d'Alexandre de l'École de technologie supérieure, 2008)</i>	54
Figure 2.11	<i>Image de la section principale du banc d'essai. (Photo de Shant Dokouzian de Hélimax énergie inc., 2008)</i>	55
Figure 3.1	<i>Points de données de la RRAN téléchargés.</i>	59
Figure 3.2	<i>Répartition des régions écoclimatiques au Québec (Ressources naturelles Canada, 2007).</i>	60
Figure 3.3	<i>Emplacement des aéroports choisis pour l'étude.</i>	60
Figure 3.4	<i>Schéma illustrant les distances entre l'aéroport et les quatre points de maille RRAN les plus près.</i>	66
Figure 4.1	<i>Valeur du CSI par modèle et par station.</i>	78
Figure 4.2	<i>Régression linéaire et nuage de points pour le modèle T, HR avec <math>HR \geq 92\%</math>.</i>	80
Figure 4.3	<i>Valeur du <math>R^2</math> en fonction de la limite d'humidité relative.</i>	80
Figure 5.1	<i>Régression linéaire et intervalle de confiance du modèle T, <math>HR \geq 92\%</math>.</i>	85
Figure 5.2	<i>Régression linéaire et intervalle de prédiction du modèle T, <math>HR \geq 92\%</math>.</i>	86
Figure 5.3	<i>Régression linéaire et intervalle de prédiction du modèle T, <math>HR \geq 92\%</math> (les six divisions verticales par aéroport représentent les six années de données, de 2000 à 2005).</i>	87

Figure 5.4	<i>Carte illustrant les heures moyennes annuelles estimées de givrage atmosphérique pour le sud de la province du Québec avec le modèle de <math>T</math>, <math>HR \geq 92\%</math> et la correction statistique (présentation visuelle : Hélimax Énergie inc.).</i>	88
Figure 5.5	<i>Prédiction des heures saisonnières de givrage atmosphérique pour le mont Valin.</i>	91
Figure 5.6	<i>Prédiction des heures saisonnières de givrage atmosphérique pour New Richmond.</i>	93
Figure 5.7	<i>Prédiction des heures saisonnières de givrage atmosphérique pour Mirabel.</i>	94
Figure I.1	<i>Atlas des heures moyennes annuelles de précipitation givrantes (document original de mauvaise qualité). (Tiré de McKay et Thomson, 1969)</i>	104
Figure I.2	<i>Atlas du nombre de jours annuel moyen d'événements de précipitations verglaçantes. (Tiré de Environnement Canada, 1987)</i>	105
Figure I.3	<i>Atlas du nombre d'occurrences moyennes annuelles de pluies verglaçantes pour la vallée du St-Laurent. (Tiré de Laflamme et Périard, 1996)</i>	106
Figure I.4	<i>Atlas de la persistance moyenne annuelle de verglas en jours pour la vallée du St-Laurent. (Tiré de Laflamme et Périard, 1996)</i>	107
Figure I.5	<i>Atlas des heures moyennes annuelles de pluies et bruines verglaçantes. (Tiré de Stuart et Isaac, 1999)</i>	108
Figure I.6	<i>Atlas des heures moyennes annuelles de précipitation verglaçantes pour l'Amérique du Nord. (Tiré de Cortinas Jr. et al., 2004)</i>	109
Figure III.1	<i>Test sur la limite à imposer à la prévision de pluie verglaçante pondérée.</i>	121

## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

AEP	Annual Energy Production
ASOS	Automated Surface Observing System
AWOS	Automated Weather Observing System
CEI	Commission électrotechnique internationale
CIP	Current Icing Potential
CSI	Critical Success Index
ECMWF	European Center for Medium range Weather Forecasting
ÉTS	École de technologie supérieure
FAR	False Alarm Rate
FMI	Finnish Meteorological Institute
FROIN	Frost on Indicator
GEM	Global environmental multiéchelle
HN	Hauteur de la base des nuages
HR	Humidité relative
ICG	Icing
ISO	Organisation internationale de normalisation
METAR	METeorological Airport Report
NCEP	National Center for Environmental Prediction
OMM	Organisation météorologique mondiale
PNT	Prévision numérique du temps
POD	Probability of Detection

PRÉ	Précipitations
PVG	Prévision de pluie verglaçante
RMK	Remark
RRAN	Réanalyse régionale de l'Amérique du Nord
RS	Radiation solaire
SMC	Service météorologique du Canada
TEL	Teneur en eau liquide
TES	Teneur en eau surfondue
VIS	Visibilité
WRF	Weather Research and Forecasting



## INTRODUCTION

### **Énergie éolienne en climat froid**

Le domaine de l'éolien est en pleine croissance et il est prévu que de plus en plus d'éoliennes soient installées en climats froids (Peltola *et al.*, 2005). Un climat froid est un climat caractérisé soit par des événements de givrage atmosphérique, soit par des températures inférieures aux limites opérationnelles d'une éolienne standard, généralement de  $-20^{\circ}\text{C}$ , soit par les deux (Laakso *et al.*, 2005). Parmi les pays où sont installées des éoliennes en climat froid, on compte le Canada, les États-Unis, plusieurs pays européens (e.g. la Finlande, la Norvège, la Suède, l'Italie, l'Allemagne, la Suisse, l'Autriche), la Chine et le Japon (Laakso *et al.*, 2003b).

Si plusieurs sites en climat froid possèdent des caractéristiques attrayantes au niveau de la ressource éolienne, les difficultés supplémentaires qu'impose un tel climat ne sont pas à sous-estimer. Pourtant, de nombreux projets sont planifiés malgré des connaissances inadéquates sur les conditions climatiques qui peuvent apparaître à ces sites (Laakso *et al.*, 2003b).

Le givrage atmosphérique, qui désigne toute accréation de glace sur un objet, est causé par la congélation de particules d'eau, de vapeur ou de neige au contact avec cet objet (American Meteorological Society, 2000). Cela mène à la formation de verglas, de neige mouillée, de gelées blanches ou de givre. Ces phénomènes peuvent altérer les propriétés aérodynamiques des pales d'éolienne, interférer avec les systèmes de contrôle de l'éolienne, augmenter les charges statiques et dynamiques sur l'éolienne, endommager certaines composantes de la structure, accroître la fatigue des composantes, créer un risque de sécurité (Lacroix et Manwell, 2000) et augmenter le bruit émis par l'éolienne (Aben, 2003). Les températures négatives, elles, peuvent fragiliser les matériaux, endommager les génératrices, les boîtes de transmission et autres composantes d'une éolienne, modifier les propriétés physiques des lubrifiants et diminuer la flexibilité des pièces de caoutchouc (Lacroix et Manwell, 2000). Finalement, les tempêtes de neige ou de verglas des climats froids peuvent aussi causer des problèmes occasionnels d'accessibilité aux sites éoliens (Laakso *et al.*, 2005). Il est en outre important de noter que le givrage atmosphérique peut interférer avec les campagnes de mesure du vent qui précèdent l'installation d'un parc éolien (Laakso et Peltola, 2003).

## Objectifs de l'étude

Bien que tous les effets du givrage atmosphérique se doivent d'être mentionnés, c'est sur la caractérisation du givrage atmosphérique d'un site, ou la caractérisation de son climat givrant, que porte la présente recherche. Les effets du givrage atmosphérique sur le parc et la production d'énergie ne sont pas considérés.

Puisque la fréquence du givrage atmosphérique peut varier de manière importante d'une année à l'autre (Farzaneh *et al.*, 2001), il est crucial de baser l'analyse de ce phénomène sur des données qui s'étendent sur plusieurs années afin d'obtenir une représentation fidèle du climat givrant d'un site. Cependant, peu de mesures directes existent sur le givrage atmosphérique et il est souvent nécessaire de recourir à des modèles qui prédisent les événements de givrage atmosphérique à partir de données météorologiques courantes. Toutefois, la performance de ces modèles n'est pas toujours connue. Le présent mémoire tente d'apporter une contribution au domaine de la caractérisation du climat givrant d'un site à travers deux objectifs distincts décrits ci-dessous.

L'objectif principal est une étude des modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique ; il est atteint en trois étapes. Tout d'abord, une méthodologie d'évaluation des modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique est mise en place. Ensuite, cette méthodologie permet d'évaluer différents modèles. Finalement, les résultats sont exploités pour voir dans quelle mesure l'un des modèles analysés peut être utile pour la cartographie des heures moyennes annuelles de givrage atmosphérique pour une région de la province du Québec.

L'objectif secondaire du mémoire est de concevoir un banc d'essai pour mesurer le givrage atmosphérique. Ce banc d'essai sera utilisé pour étudier différents modèles et méthodes de détection du givrage atmosphérique *in situ* et pour comparer ces différents modèles et méthodes entre eux. Ainsi, avec ce banc d'essai, il sera possible de savoir quels instruments ou combinaisons d'instruments permettent de mieux caractériser et détecter les événements givrants du site pendant la période de mesure. Le banc d'essai est installé depuis peu, donc l'analyse de ses données ne peut être incluse dans ce travail. Dans le présent mémoire, il est uniquement question de se pencher sur le choix d'instruments de mesure à installer et de déterminer leurs positions sur la tour de mesure.

Il est important de noter que, dans le domaine de l'éolien, ce ne sont pas uniquement les périodes de givrage atmosphérique qui sont d'intérêt, mais aussi la persistance des accrétions,

le type de givre ou glace formé, et l'intensité d'accrétion. Dans le cadre de ce travail, il est principalement question d'aborder la problématique d'estimation des périodes de givrage atmosphérique. Le banc d'essai conçu, toutefois, permettra d'évaluer ces quatre caractéristiques du givrage atmosphérique.

### **Structure du mémoire**

Suite à l'introduction, le premier chapitre du mémoire effectue une revue de la littérature. Ce chapitre décrit les caractéristiques importantes du givrage atmosphérique et certaines des problématiques de la caractérisation du climat givrant d'un site. Il décrit aussi les modèles de prédictions des événements de givrage atmosphérique existants. Le chapitre se termine par une revue des données météorologiques pouvant servir aux objectifs de ce mémoire.

Le deuxième chapitre se concentre spécifiquement sur le banc d'essai. Il présente les différents instruments de mesure qui peuvent être utiles pour ce type d'installation, discute du choix de quelques-uns de ces instruments et décrit la disposition des instruments choisis sur une tour de mesure.

Le troisième chapitre établit une méthodologie permettant d'évaluer la performance de modèles de prédictions d'événements de givrage atmosphérique. Le prétraitement des données utilisées pour les analyses y est aussi décrit, ainsi que les indices de performance choisis et l'information que ces indices apportent.

Le quatrième chapitre présente et discute des résultats de l'analyse de différents modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique.

Le cinquième chapitre reprend l'un des modèles analysés au chapitre cinq et l'applique sur l'ensemble du sud du Québec afin de tracer une carte des heures moyennes annuelles de givrage atmosphérique. Les limites du modèle et de la carte font l'objet d'une discussion.

Le cinquième chapitre est suivi de la conclusion, qui reprend les grands thèmes du mémoire et résume les résultats. La conclusion décrit aussi les contributions au domaine et émet quelques recommandations.



## CHAPITRE 1

### REVUE DE LA LITTÉRATURE

La revue de la littérature qui suit débute avec une introduction sur ce qu'est le givrage atmosphérique. Elle décrit ensuite les différentes classifications, les processus de formation et les caractéristiques physiques, spatiales et temporelles du givrage atmosphérique. Puis, il est question d'aborder la littérature propre à l'évaluation du climat givrant d'un site. Différentes méthodes de caractérisation du climat givrant d'un site sont décrites, ainsi que les défis de la mise en application de ces méthodes. Par la suite, sont présentés divers modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique qui se retrouvent dans la littérature. En fin de chapitre se trouve une revue des données météorologiques pouvant servir aux objectifs de la recherche.

#### 1.1 Givrage atmosphérique

Le givrage atmosphérique désigne tout phénomène atmosphérique qui produit des accumulations de glace sur un substrat. Ces accumulations peuvent être dues à des chutes de neige, à des pluies ou bruines verglaçantes, et à des brouillards ou nuages givrants. Puisque le givrage atmosphérique se présente sous plusieurs formes, il est utile de le classer, et en fonction des auteurs, cela se fait principalement de deux manières différentes : on peut utiliser une classification orientée davantage vers les propriétés physiques de l'accrétion de glace, ou on peut classer le givrage atmosphérique selon les conditions météorologiques au moment de sa formation (Savadjiev et Farzaneh, 2004).

La classification par conditions météorologiques donne naissance à deux types de givrages atmosphériques, soit celui causé par les précipitations givrantes (« precipitation icing ») et celui causé par le brouillard ou les nuages givrants (« in-cloud icing ») (Savadjiev et Farzaneh, 2004). Comme l'indiquent les noms donnés à ces types de givrage atmosphérique, le premier comprend toute forme de givrage atmosphérique qui résulte de précipitations, donc de pluie ou de bruine verglaçante et de neige, et le deuxième comprend tout type de givrage atmosphérique qui se forme en présence de nuages et de brouillards ou brumes surfondus (brouillards, brumes ou nuages dont la température des gouttelettes d'eau est inférieure au point de congélation). On rencontre souvent cette classification dans la littérature.

La classification orientée vers les propriétés physiques du givrage, elle, divise le givrage atmosphérique en quatre types selon les propriétés de l'accrétion formée : givre, verglas, neige

mouillée et gelée blanche (Poots, 1996; Ross, 2002). Des photos de ces quatre types de givrage atmosphérique sont fournies à la figure 1.1, et les propriétés physiques de chacun sont résumées au tableau 1.1. Cette seconde classification est aussi communément retrouvée dans la littérature.

Tableau 1.1

Propriétés des différents types de givrage atmosphérique (Tiré de Minsk, 1980; Organisation internationale de normalisation, 2000; Ross, 2002)

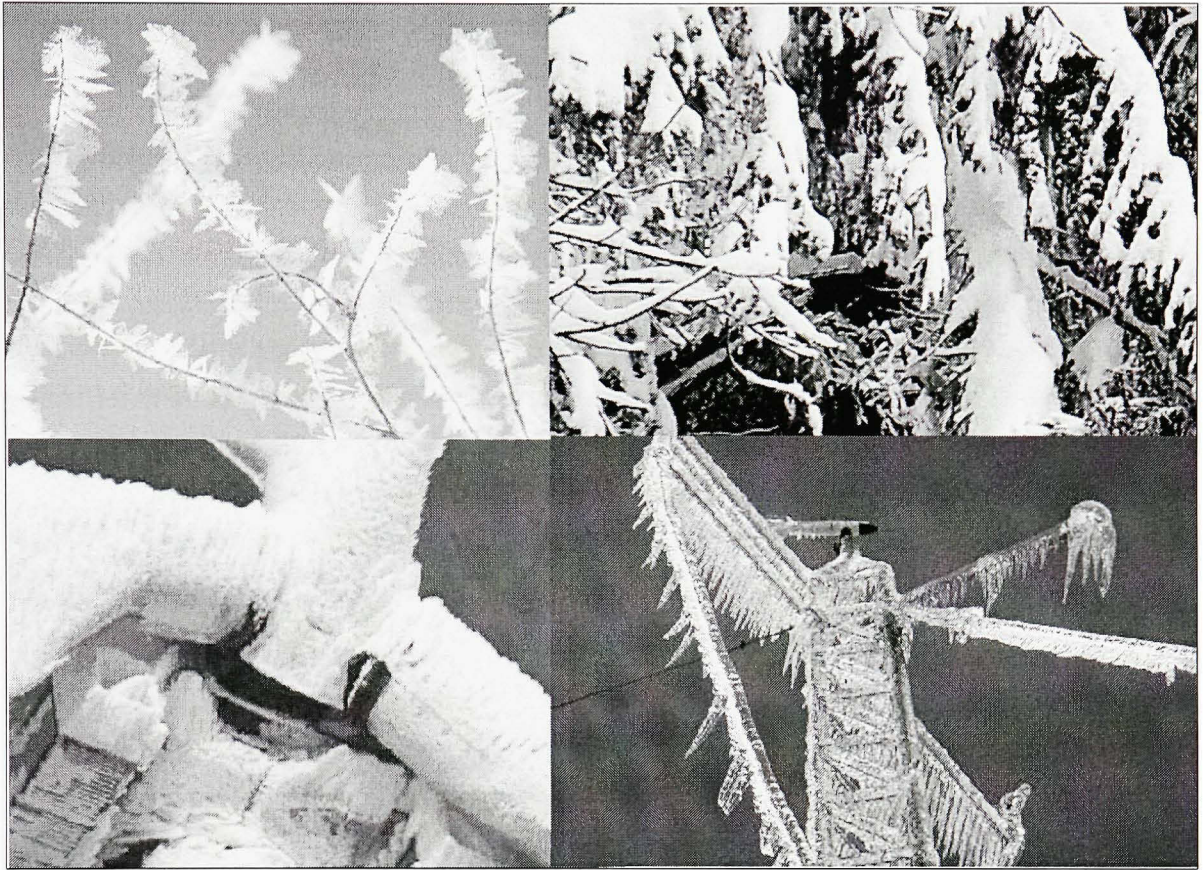
Type	Apparence	Caractéristiques	Densité	Adhésion
<i>Verglas</i> « Glaze »	Transparent	Dur, dense et fragile	$0.8 - 0.9 \text{ g cm}^{-3}$	Très forte
<i>Givre</i> « Rime »	Opaque et laiteux	Matrices de cristaux et cônes cristallins	$0.1 - 0.7 \text{ g cm}^{-3}$	Forte
<i>Neige mouillée</i> « Wet snow »	Opaque et blanc	Variable	$0.3 \text{ g cm}^{-3}$ au moment de l'accrétion et jusqu'à $0.7 \text{ g cm}^{-3}$ par la suite	Très variable
<i>Gelée blanche</i> « Hoar frost »	Cristaux blancs	Très fragile	$0.1 \text{ g cm}^{-3}$	Peut être forte

Sources : Ce tableau a été composé à partir d'informations tirées d'une norme de l' Organisation internationale de normalisation, 2000, de Ross, 2002 et de Minsk, 1980.

Le givre peut être subdivisé en deux sous-types : le givre dur et le givre mou (Minsk, 1980). Le givre lourd est le plus dense des deux et ses propriétés et son apparence se rapprochent de celles du verglas. Le givre léger est le moins dense des deux et sa structure est plus cristalline.

Plusieurs facteurs déterminent lequel des types de givrage atmosphérique se forme. Ce qui suit explique les processus de formation des différents types de givrage atmosphérique, et décrit l'influence de certains paramètres météorologiques.





**Figure 1.1** *Verglas, givre, gelée blanche et neige mouillée.* (Tirées de Clark, 2006; Daily et Daily, 2006; Maissan et Love, 2004; Oklahoma Climatological Survey, 2006)

Sources : Ces figures sont tirées de Clark, 2006, Daily et Daily, 2006, Oklahoma Climatological Survey, 2006 et Maissan et Love, 2004 et correspondent à des images affichées sur les sites web.

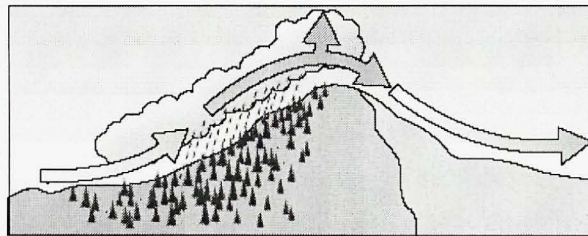
### 1.1.1 Processus de formation du givre et du verglas

Le givre et le verglas se forment à partir de gouttes ou gouttelettes d'eau surfondues en suspension dans l'atmosphère, c'est-à-dire de gouttes à l'état liquide, mais dont la température est sous le point de congélation. L'eau se retrouve dans cet état métastable lorsqu'il n'existe pas de médium sur lequel elle peut se solidifier (Sumner, 1988). Théoriquement, en l'absence de noyaux de congélation ou de surface solide, les gouttes peuvent demeurer à l'état liquide jusqu'à une température de  $-40^{\circ}\text{C}$  (Sumner, 1988).

Des gouttelettes d'eau surfondues peuvent apparaître dans l'atmosphère dans différentes conditions météorologiques. Leur présence peut être due à une montée orographique, à de la tur-

bulence, à des inversions de température ou à une rencontre entre un front chaud et un front froid.

Une montée orographique ou montée forcée d'air peut se produire lorsqu'il y a une variation d'élévation au sol (i.e. une falaise ou une montagne) (Sumner, 1988). Ce phénomène est illustré à la figure 1.2. Lorsqu'une parcelle d'air chaud est forcée de monter, la pression, qui diminue avec l'altitude, devient de moins en moins importante et la parcelle prend de l'expansion. Cette expansion se fait au profit d'un abaissement de la température. Quand la température de la parcelle d'air devient inférieure au point de rosée et que l'air est saturé, il y a condensation et un nuage se forme. Quand la température de la parcelle d'air passe sous le point de congélation, les gouttelettes d'eau deviennent surfondues. Si les gouttelettes d'eau sont suffisamment grosses, il y a précipitation (une goutte de pluie a un diamètre moyen de 1 mm) (Sumner, 1988). Les nuages ayant des températures négatives peuvent contenir à la fois des gouttelettes surfondues et des cristaux de glace (Sumner, 1988).



**Figure 1.2** *Illustration de la formation de nuage par montée forcée d'air.* (Tirée de Klock *et al.*, 2001)

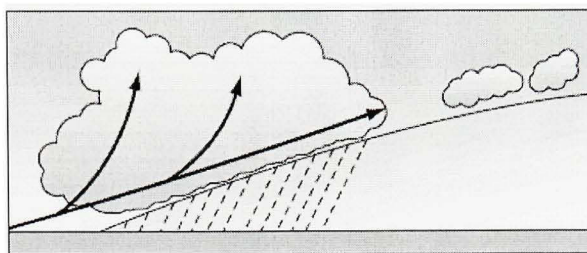
Source : Cette figure est tirée de Klock *et al.*, 2001 « Le temps en Ontario et au Québec » et correspond à la « Fig. 1-6 - Air humide gravissant une montagne en perdant de son humidité puis redescendant dans une zone de subsidence sèche » présentée en page 4 dans le document original.

Des nuages ou brouillards de gouttelettes surfondues peuvent aussi être la conséquence de refroidissement de l'air *in-situ* ou de turbulence. Des obstacles, la rugosité du sol et le vent induisent de la turbulence dans la couche limite atmosphérique (les premiers 500 à 1000 m de l'atmosphère), ce qui provoque un mélange entre l'air chaud à la surface et l'air froid un peu plus en altitude (Sumner, 1988). Lorsque l'humidité dans l'air est suffisamment élevée et la température assez basse, cela provoque aussi la formation de nuages surfondus.

La formation de nuages peut aussi être la conséquence de la rencontre entre un front chaud et un front froid, tel qu'illustré à la figure 1.3. L'arrivée du front chaud au-dessus du front froid



provoque un refroidissement du front chaud, refroidissement qui peut provoquer la formation de nuage, et éventuellement, des précipitations (Fortin, 2007).



**Figure 1.3** *Illustration de la formation de nuages par la rencontre d'un front froid et d'un front chaud.* (Tirée de Klock *et al.*, 2001)

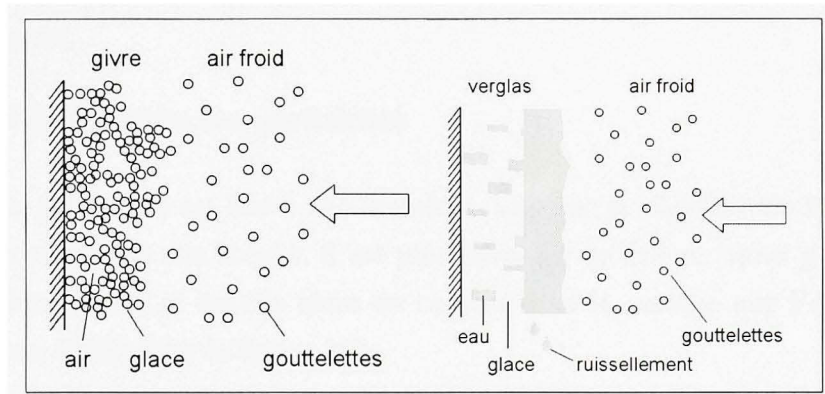
Source : Cette figure est tirée de Klock *et al.*, 2001 « Le temps en Ontario et au Québec » et correspond à la « Fig. 1-4 - Air chaud montant sur l'air froid d'un front chaud » présentée en page 3 dans le document original.

Finalement, le givrage atmosphérique peut aussi être dû à une inversion de température, c'est-à-dire lorsqu'il y a une couche d'air froid ( $T < 0^{\circ}\text{C}$ ) au sol et une couche d'air plus chaud ( $T > 0^{\circ}\text{C}$ ) au-dessus (Bourgouin, 2000; ElFashny *et al.*, 1998). Des précipitations existantes à plus haute altitude, comme de la neige ou de la grêle, fondent en passant par la couche d'air chaud et ensuite se refroidissent et deviennent surfondues dans la couche d'air froid à la surface (McKay et Thomson, 1969). La vitesse du vent dans ce cas est généralement faible, car la turbulence générée par des vents modérés ou forts élimine les inversions de température (Ross, 2002).

Une fois les nuages, le brouillard ou les précipitations surfondus formés, l'accrétion de glace a lieu quand les gouttes ou les gouttelettes entrent en contact avec un substrat dont la température est sous le point de congélation (American Meteorological Society, 2000). À cette étape, plusieurs facteurs entrent en jeu pour décider du type d'accrétion formé - le givre ou le verglas. Les auteurs évoquent le plus souvent la température de l'air, le diamètre des gouttelettes, la vitesse du vent et la teneur en eau liquide comme facteurs déterminants (ElFashny, 2002; Makkonen, 1984; Minsk, 1980). Ces derniers influencent tous la vitesse de congélation de la gouttelette. Makkonen (1984) explique que le type de givrage atmosphérique formé dépend de  $\tau_c$ , le temps de congélation d'une gouttelette, et de  $\delta\tau$ , l'intervalle de temps entre l'impact de deux gouttelettes successives. Quand  $\tau_c \geq \delta\tau$ , le temps de congélation des gouttelettes est plus long ou égal à l'intervalle de temps entre l'impact de deux gouttelettes successives et il y a formation de verglas. Quand  $\tau_c < \delta\tau$ , le temps de congélation des gouttelettes est

plus court que l'intervalle de temps entre l'impact de deux gouttelettes successives et il y a formation de givre lourd. Et finalement, lorsque  $\tau_c \ll \delta\tau$ , le temps de congélation des gouttelettes est beaucoup plus court que l'intervalle de temps entre l'impact de deux gouttelettes successives et il y a formation de givre léger.

La figure 1.4 schématise une accréation de givre à gauche, et une accréation de verglas à droite. Lorsque les gouttelettes ont le temps de complètement congeler, l'accréation est une matrice de cristaux superposés (schéma de gauche). Lorsque les gouttelettes ne terminent pas leur processus de congélation avant l'arrivée de nouvelles gouttelettes, les nouvelles particules d'eau se joignent à l'accréation dense et congelée ou semi-congelée en formation (schéma de droite).



**Figure 1.4** À gauche, la schématisation de l'accréation de givre, et à droite, la schématisation de l'accréation de verglas. (Tirées de Makkonen, 2000 [traduction libre])

Source : Ces figures sont tirées de Makkonen, 2000 « Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures » et correspondent aux « Figure 6. Growth of rime ice » et « Figure 7. Growth of glaze ice » présentées en pages 2917 et 2918 dans le document original.

#### 1.1.1.1 Effet de la température de l'air

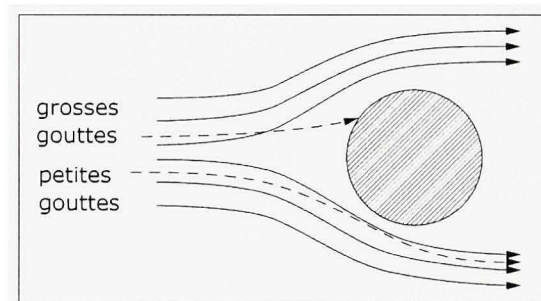
La température de l'air influence le taux de transfert de chaleur par convection entre la goutte et l'environnement lorsque celle-ci passe de l'état liquide à l'état solide (Minsk, 1980). La température des gouttelettes augmente jusqu'à 0°C lors du processus de congélation dû à la libération de chaleur latente de fusion (Minsk, 1980). Cette chaleur est ensuite dissipée dans l'environnement plus ou moins rapidement, en fonction entre autres de la température de l'air.

La température de l'air a un autre effet sur la vitesse de congélation des gouttelettes. Lorsqu'il y a formation de gouttelettes surfondues, il y a aussi création d'un déficit de chaleur sensible

dans ces gouttelettes (Ross, 2002). La chaleur sensible est le nom donné à la chaleur qui, lorsque transférée à une substance, en augmente ou en diminue la température, mais n'en altère pas l'état (Météo France, 2003). Ce déficit est donc créé par le fait que les gouttelettes se retrouvent à des températures sous le point de congélation, mais toujours à l'état liquide (Ross, 2002). Plus la température de l'air est basse, plus le déficit est important (Ross, 2002). Lorsque les gouttelettes heurtent une surface et que le processus de solidification débute, ce déficit de chaleur sensible absorbe une partie de la chaleur latente de fusion libérée (Ross, 2002). Dans un environnement naturel, il est considéré comme exceptionnel que le déficit de chaleur sensible soit assez grand pour réabsorber la totalité de cette chaleur latente (Ross, 2002). Mais, plus le déficit de chaleur sensible est important, plus la partie de chaleur latente de vaporisation absorbée immédiatement est importante et plus la congélation est rapide, ce qui favorise la formation de givre.

#### 1.1.1.2 Effet du diamètre des gouttelettes

L'inertie d'une gouttelette est liée à son diamètre. Lorsque le diamètre de la gouttelette est grand, et par conséquent son inertie, il est plus probable qu'elle ne suive pas les lignes de courant de l'écoulement et qu'elle entre en contact avec la surface que l'écoulement, lui, contourne (Ross, 2002) (voir la figure 1.5).



**Figure 1.5** *Illustration de l'effet du diamètre des gouttelettes sur la captation.* (Tirée de Makkonen, 2000 [traduction libre])

Source : Cette figure est tirée de Makkonen, 2000 « Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures » et correspond à la « Figure 5. Air streamlines and droplet trajectories around a cylindrical object » présentée en page 2917 dans le document original.

Donc, plus le diamètre des gouttelettes est important, plus le nombre de gouttelettes d'eau heurtant la surface du substrat est important, et plus  $\delta\tau$ , l'intervalle de temps entre l'impact

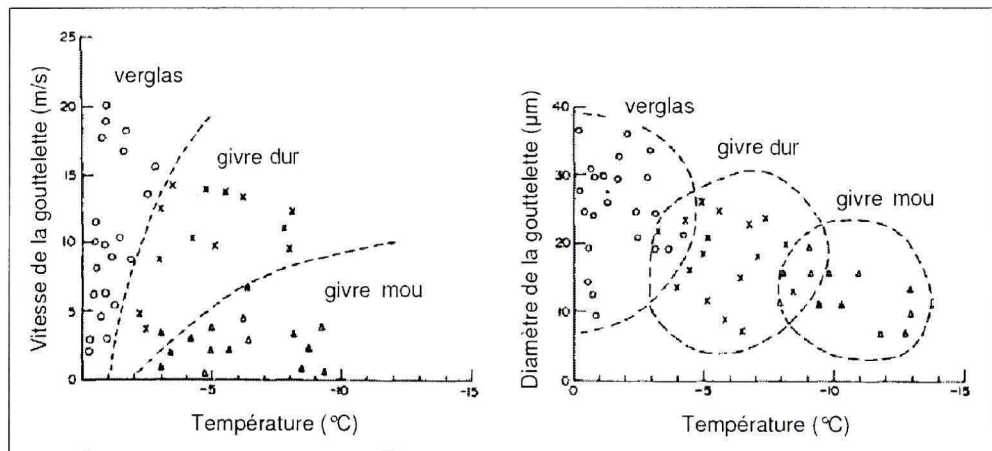


de deux gouttelettes successives, diminue. Conséquemment, plus les gouttelettes sont grosses, plus la formation de verglas est favorisée.

### 1.1.1.3 Effet de la vitesse du vent

La vitesse du vent influence aussi le type d'accrétion formé. Plus la vitesse du vent est grande, plus la fraction de gouttelettes dans l'air impactant le substrat est importante (Minsk, 1980). Par conséquent, l'intervalle de temps entre l'impact de deux gouttelettes successives diminue. À de faibles vitesses de vent, toutes les gouttelettes peuvent avoir le temps de compléter leur processus de congélation, mais à partir d'une certaine vitesse, la chaleur latente de fusion libérée par les gouttelettes devient trop grande à cause du grand nombre de particules qui heurtent la surface (Minsk, 1980). Donc, une partie de l'eau reste à l'état liquide, ce qui favorise la formation de verglas.

Pour résumer les trois facteurs expliqués jusqu'ici, la figure 1.6 illustre la continuité entre les conditions atmosphériques de formation du givre mou, du givre dur et du verglas, en fonction de la température de l'air, du diamètre des gouttelettes et de la vitesse du vent.



**Figure 1.6** *Relation entre les conditions atmosphériques et le type de givrage pour deux sites au Japon.* (Tirée de McKay et Thomson, 1969 [traduction libre])

Source : Cette figure est tirée de McKay et Thomson, 1969 « Estimating the Hazard of Ice Accretion in Canada from Climatological Data » et correspond à la « Fig.2. Relation between types of icing and meteorological conditions » présentée en page 929 dans le document original.



#### 1.1.1.4 Effet de la teneur en eau liquide

La teneur en eau liquide quantifie la masse d'eau qui se trouve dans un volume d'air (Fortin, 2003). Plus la teneur en eau liquide est élevée, plus la quantité d'eau impactant le substrat est importante, et par conséquent le temps de congélation des gouttelettes est plus long.

La teneur en eau liquide est un paramètre qui sert aussi à définir la limite de Ludlam qui à son tour, permet de distinguer entre deux types d'accrétions. La limite de Ludlam est la valeur de teneur en eau liquide à partir de laquelle la chaleur générée par la congélation des gouttelettes sur un substrat est suffisamment grande pour porter la température de ce dernier à zéro (Mazin *et al.*, 2001). Au-delà de cette limite (c'est-à-dire pour des valeurs de teneur en eau liquide supérieures ou égales) le régime d'accrétion est dit humide (Mazin *et al.*, 2001). Lors d'accrétion en régime humide, il se forme un film d'eau sur la surface, tel que schématisé dans le dessin de droite sur la figure 1.4 et une partie de l'eau est évacuée, gèle ailleurs, ou forme une glace spongieuse (Mazin *et al.*, 2001). Si, au contraire, la teneur en eau liquide n'est pas importante au point d'augmenter la température du substrat à zéro, le régime d'accrétion est dit sec, et l'eau surfondue qui impacte la surface gèle, tel que schématisé dans le dessin de gauche de la figure 1.4 (Fortin *et al.*, 2004; Mazin *et al.*, 2001). La limite de Ludlam se définit par la teneur en eau liquide, mais elle est aussi fonction d'autres paramètres météorologiques tels que la vitesse du vent et la température de l'air (Mazin *et al.*, 2001).

#### 1.1.1.5 Autres influences

Puisque la vitesse du vent varie avec la hauteur à partir du sol (la variation est souvent modélisée par un profil logarithmique), le type de givrage atmosphérique formé peut aussi varier en fonction de cette hauteur. D'autres facteurs ayant une influence importante sont les propriétés du substrat. Par exemple, la taille, la géométrie et les propriétés aérodynamiques peuvent avoir un effet sur le nombre de gouttelettes qui impactent et qui se solidifient sur la surface (Minsk, 1980; Ross, 2002).

### 1.1.2 Processus de formation de la neige mouillée et de la gelée blanche

La neige mouillée, ou neige fondante, et la gelée blanche sont des types d'accrétions dont il est moins souvent question dans la littérature, soit à cause de leur influence minimale sur les parcs éoliens, soit dû à la rareté de leur occurrence. Ross (2002), par exemple, rapporte que l'accrétion de neige mouillée sur les éoliennes ne semble pas être très commune. Quant

aux gelées blanches, elles ne produisent que des accumulations mineures de glace, mais étant donné la structure cristalline des accumulations, elles peuvent considérablement augmenter la rugosité des pales d'une éolienne (Ross, 2002). Toutefois, elles sont si fragiles qu'elles fondent facilement au soleil, sont rapidement emportées par le vent ou disparaissent aisément par sublimation (Ross, 2002). Cela porte Makkonen (2000) et Ross (2002) à affirmer que les gelées blanches demeurent un phénomène négligeable par rapport au givre et au verglas en ce qui a trait au givrage atmosphérique sur les éoliennes.

La neige mouillée est un phénomène qui se produit généralement à des températures près de zéro, entre  $-1$  et  $1$  °C, et à des vitesses de vent inférieures à 3 m/s (McKay et Thomson, 1969; Ross, 2002). On associe aussi ce phénomène à une importante teneur en eau liquide dans l'atmosphère (Poots, 1996) et à une humidité relative près de la saturation (Makkonen et Laakso, 2005). C'est l'eau sur la surface des flocons qui permet à la neige d'adhérer à un substrat, car cette eau gèle en entrant en contact avec le substrat (Ross, 2002). La neige peut devenir mouillée de deux façons : soit elle coexiste avec des gouttelettes d'eau, dans du brouillard ou des nuages (Ross, 2002), soit elle traverse dans sa chute une couche d'air chaud et il y a transfert de chaleur entre l'air et les flocons (Bourgouin, 2000; Ross, 2002).

Les gelées blanches (aussi appelées gelées ou phénomènes de gel) se forment comme les rosées, mais à des températures négatives (American Meteorological Society, 2000; Ross, 2002). C'est un phénomène où la vapeur d'eau se transforme en solide sur un substrat. Le phénomène se produit lorsque la vapeur d'eau est refroidie en dessous du point triple du diagramme de phase pour la vapeur d'eau, où la vapeur d'eau passe directement à l'état solide sans passer par l'état liquide. Pour qu'il y ait cristallisation, la température du substrat doit être inférieure à la température du point de rosée et plus la différence entre ces deux températures est grande, plus l'accumulation de gelée sera importante (Karlsson, 2001). En général, on observe de la gelée lors de vents faibles (Ross, 2002; Sumner, 1988) et pour une humidité relative de l'air élevée (Karlsson, 2001).

### **1.1.3 Caractéristiques spatiales et temporelles du givrage atmosphérique**

Les caractéristiques spatiales et temporelles du givrage atmosphérique sont importantes à comprendre lorsqu'il est question de récolter et d'analyser des données concernant ce phénomène.



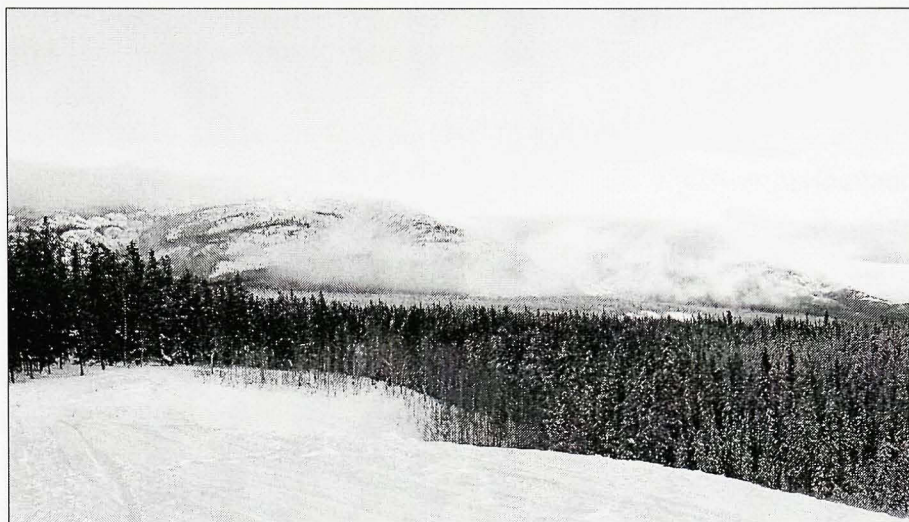
Le givrage atmosphérique est un phénomène très variable dans le temps, et il est important d'analyser des données sur une assez longue période afin d'en tirer des conclusions (Makkonen et Ahti, 1994). En effet, d'une année à l'autre, il est possible que le nombre d'événements givrants pour un même site varie de manière significative. Par exemple, Farzaneh *et al.* (2001) ont constaté que New Richmond en Gaspésie a connu cinq ans sans aucun événement de givrage atmosphérique suivi de sept ans avec 17 événements de givrage atmosphérique par an. Un échantillon de données de quelques années peut aussi être insuffisant dû au fait que le givrage atmosphérique à certains sites peut être relativement rare (Makkonen et Ahti, 1994). Afin d'obtenir des valeurs représentatives des moyennes et des extrêmes d'un phénomène météorologique, l'Organisation météorologique mondiale (OMM) recommande l'étude de 30 ans de données (Environnement Canada, 2003).

Un autre aspect de la variabilité temporelle du givrage atmosphérique est la durée des événements. À Murdochville, en Gaspésie, deux hivers de mesures ont détecté des périodes de givrage atmosphérique allant de 0.7 à 31.2 heures (Fortin *et al.*, 2006). En général, les événements de précipitations givrantes (verglas ou neige mouillée) se mesurent en heures, et les événements de givre se mesurent en jours (Organisation internationale de normalisation, 2000).

Il est aussi pertinent de tenir compte du fait que la période pendant laquelle l'accrétion de glace demeure sur un substrat peut dépasser la période de givrage atmosphérique elle-même. Ainsi, un événement de courte durée, mais d'une intensité importante peut produire une accrétion dont l'influence sur le substrat ou la structure est non négligeable.

Les phénomènes de givrage atmosphérique peuvent aussi varier beaucoup d'un endroit à un autre. La topographie (Guesdon, 2000; Makkonen et Ahti, 1994; McKay et Thomson, 1969; Wichura, 2005) et la proximité à des étendues d'eau (sources d'humidité) (Guesdon, 2000; Wichura, 2005) peuvent influencer la fréquence d'occurrence et le type de givrage atmosphérique. C'est généralement dans les zones montagneuses que le givrage atmosphérique est le plus sévère (Organisation internationale de normalisation, 2000). Dans une étude portant sur 25 ans de données de givrage atmosphérique en Allemagne, Wichura (2005) a observé qu'un site près de la mer Baltique a été touché surtout par des événements de verglas et de givre lourd, alors qu'il y a surtout eu du givre léger à un site montagneux à l'intérieur des terres. Lacroix et Manwell (2000) écrivent que le givre est le type de givrage le plus fréquent sur les sommets de montagnes et de collines.

La figure 1.7 montre jusqu'à quel point un événement de givrage atmosphérique peut être local. Dans cette photo de Grey Mountain, au Yukon, un nuage de givre s'accroche à certains sommets, tandis que d'autres parties du paysage restent exposées au soleil.



**Figure 1.7** *Photo d'un nuage de givre sur Grey Mountain.* (Photo de John Maissan, 2006)

Dans un contexte de caractérisation de climat givrant, il est donc naturel de vouloir analyser des données avec une résolution spatiale et temporelle suffisamment fine pour ne pas négliger toutes les spécificités d'un site.

## 1.2 Caractérisation du climat givrant d'un site

Caractériser le climat givrant d'un site comporte encore bien des défis. Afin de savoir comment procéder, il est possible de se référer à une norme de l'Organisation internationale de normalisation (ISO), la norme ISO 12949 : Charges sur les structures dues à la glace (Organisation internationale de normalisation, 2000). Celle-ci décrit une procédure générale de détermination des charges qu'exerce le poids de la glace sur les structures et des charges de vent sur les structures glacées. Dans cette optique, elle recommande trois méthodes pour récolter des données sur le givrage atmosphérique :

1. Rassembler des données à partir d'expériences existantes ;
2. Modéliser le givrage à l'aide des paramètres météorologiques, ou ;
3. Effectuer des mesures directement au site pendant plusieurs années.



La première approche consiste à consulter des gens avec de l'expérience dans le domaine des tours de télécommunication ou de transport aérien d'électricité, par exemple, afin de profiter des connaissances qu'ils auront pu acquérir au cours des années sur le givrage atmosphérique de leurs installations. Toutefois, il est recommandé de compléter ces informations avec la troisième méthode, soit des mesures sur une longue période.

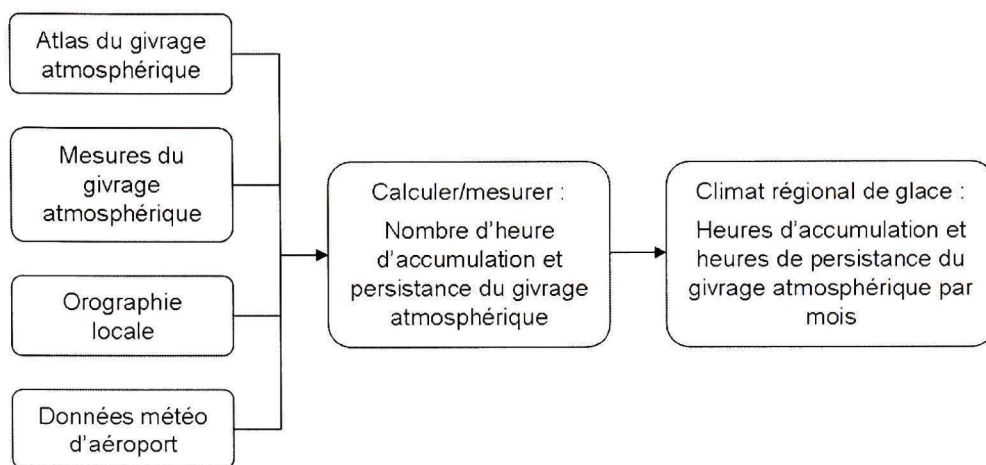
Pour la deuxième méthode, des précisions sont fournies quant à la manière de modéliser le givrage atmosphérique. Une première annexe présente une équation permettant de calculer le taux d'accrétion de la glace. Toutefois, pour utiliser cette équation, il est nécessaire de connaître la teneur en eau liquide et le diamètre des gouttelettes d'eau surfondues, paramètres météorologiques qui, comme l'explique la norme, sont rarement mesurés. Une deuxième annexe décrit de quelle manière il est possible d'estimer l'importance du givrage à un site en utilisant des données météorologiques plus standards (cette méthode est détaillée à la section 1.3).

Finalement, la troisième méthode consiste à effectuer des mesures pendant une période pouvant varier de quelques années à quelques décennies, en fonction des conditions au site. Il est important que la longueur de la période soit suffisante pour une analyse des valeurs extrêmes. La norme émet des recommandations générales concernant la procédure à suivre pour une campagne de mesures. L'instrument de mesure recommandé est un cylindre vertical en rotation d'un diamètre de 30 mm et d'une longueur d'au moins 0.5 m. Les informations à récolter peuvent être la masse de l'accrétion, ses dimensions, sa forme, le type d'accrétion, la direction du vent lors de l'accrétion, etc.

À travers des mesures au site et des collectes de données sur plusieurs années, les recommandations de la norme permettent de tenir compte du caractère local du givrage atmosphérique ainsi que de la variabilité interannuelle que peut exhiber ce phénomène météorologique.

Dans le rapport du projet « NEW ICETOOLS » (Tammelin *et al.*, 2005), on propose aussi les grandes lignes d'une méthode d'évaluation du climat givrant, cette fois-ci appliquées spécifiquement à un site éolien en climat froid. Même si cette recommandation n'a pas le même poids qu'une norme ISO, il a tout de même été considéré pertinent de l'inclure ici. La recommandation peut être résumée sous forme d'un schéma (voir figure 1.8).

La figure 1.8 recommande de combiner différentes informations pour réussir à dresser le portrait du climat givrant d'un site. Il est recommandé de consulter un atlas du givrage atmo-



**Figure 1.8** *Schéma pour la caractérisation du climat givrant d'un site éolien.* (Tiré de Tammelin *et al.*, 2005 [traduction libre])

Source : Ce schéma est tiré de Tammelin *et al.*, 2005 « Wind Turbines in Icing Environment : Improvement of Tools for Siting, Certification and Operation - NEW ICETOOLS » et correspond à la « Figure 35. Suggested method for the estimation of local ice climate » présentée en page 46 dans le document original.

sphérique, d'effectuer des mesures au site, de tenir compte de l'orographie locale et d'aller chercher des données d'aéroport.

Un atlas du givrage atmosphérique est une carte qui illustre la répartition géographique d'une caractéristique moyenne annuelle du givrage atmosphérique. Souvent, ces atlas montrent les heures moyennes annuelles de givrage, ou la fréquence moyenne annuelle d'événements givrants ; moyennes calculées à partir de plusieurs années de données. Puisque de tels atlas ne tiennent pas toujours compte des spécificités locales d'un site, il est aussi recommandé de procéder à des mesures au site même. Toutefois, il est important de souligner qu'il a été démontré qu'il n'existe pas de méthode ou d'instrument de référence fiable pour la mesure du givrage atmosphérique (Fikke *et al.*, 2007; Laakso *et al.*, 2003b; Peltola *et al.*, 2005; Tammelin *et al.*, 2005). Ensuite, il est considéré important de prendre en considération l'orographie locale. Finalement, le schéma de la figure 1.8 recommande l'analyse de données d'aéroports, données qui, de manière générale, fournissent plus d'information que des stations de mesure standard. Aussi, les données d'aéroport sont souvent disponibles pour une longue période de temps. Néanmoins, si le site n'est près d'aucun aéroport, cette solution est difficilement applicable. Il est bien sûr possible d'extrapoler ou d'interpoler au site, mais Makkonen (1994) souligne qu'étant donné la complexité des phénomènes de givrage atmosphérique, il est pré-



férable d'extrapoler ou d'interpoler les paramètres météorologiques dont dépendent le givrage atmosphérique plutôt que d'extrapoler les données du givrage atmosphérique elles-mêmes.

Tout comme les recommandations de la norme ISO, le cheminement recommandé par le rapport « NEW ICETOOLS » tient compte du fait que les phénomènes de givrage atmosphérique peuvent être très variables dans le temps et dans l'espace.

### **1.2.1 Ressources existantes pour la caractérisation du climat givrant**

Certaines des ressources nécessaires pour la mise en oeuvre des recommandations émises soit par la norme ISO 12494 ou par le rapport « NEW ICETOOLS » sont déjà disponibles aujourd'hui au Québec. Il existe des nombreux aéroports où sont enregistrés les événements de givrage atmosphérique, et des données sur l'orographie sont accessibles à tous. De plus, il existe quelques atlas du givrage et des données sur le givrage atmosphérique. Ces ressources sont décrites plus en détail dans ce qui suit.

#### **1.2.1.1 Atlas du givrage atmosphérique**

Il existe différentes cartographies du givrage atmosphérique pour le Canada et une pour une partie du Québec, mais toutes sont pour les précipitations givrantes uniquement. Il n'existe pas de carte publique qui trace la répartition géographique de givrage atmosphérique dû à des nuages ou du brouillard. Ainsi, il est intéressant de tenir compte de l'information que procurent les cartes existantes, mais pour des applications dans le domaine de l'énergie éolienne, elle n'est pas suffisante. Ces différents atlas givrants publics sont inclus à l'annexe I.

#### **1.2.1.2 Données sur le givrage atmosphérique**

Au Québec, il existe une base de données sur le givrage atmosphérique. Hydro-Québec a installé un réseau de détecteurs de glace passifs, les glaciètres ou « Passive Ice Meters » (PIM). La campagne de mesure a débuté avec 35 stations glaciétriques en 1974, et à travers les années d'autres stations se sont rajoutées et certaines ont été retirées (ElFashny, 2002). En 1995, 148 stations étaient encore actives (ElFashny, 2002), et en 2006, il en restait 58 (Carrière, 2006). Dans la vallée du St-Laurent, où il y a la plus grande concentration de glaciètres, la résolution spatiale de la base de données était d'approximativement 50 km en 2002 (ElFashny, 2002). À partir de ces données, il a été possible de constituer une vaste base de données sur l'épaisseur des accrétions de glace, sur les types de dépôts et sur la fréquence et la durée des événements. De plus, lors de chaque mesure, la température, la vitesse du vent et la direction

du vent ont été notées. Les mesures sont effectuées deux fois par jour du 15 octobre au 15 mai au sud du 50<sup>ième</sup> parallèle, et du 15 septembre au 15 juin au nord de celui-ci (ElFashny, 2002). Cette base de données a été mise sur pied afin d'aider Hydro-Québec à mieux déterminer les charges sur les lignes de transport d'électricité.

L'avantage principal d'utiliser la base de données glaciométrique pour caractériser le climat givrant d'un site est que les mesures effectuées sont des mesures réelles d'accrétion de glace. Ce ne sont pas des approximations ni des mesures indirectes, les mesures effectuées représentent l'épaisseur de l'accrétion réelle et le type d'accrétion réel au moment de la mesure. De surcroît, les stations de mesures glaciométriques sont situées près des lignes de transport électriques, endroits où l'on cherche souvent à installer les parcs éoliens. Un autre avantage est la longue période de données et le nombre important de stations de mesure. Cependant, le nombre de stations actives a diminué rapidement de 1995 à 2006. En plus, beaucoup des stations de mesure n'ont pas été en opération continue pendant cette période. En 1995, 91 des stations possédaient des données pour une période de 20 ans ou plus, un certain nombre de stations avaient très peu d'années de données, et pour d'autres, il y a eu des discontinuités d'une ou de quelques années dans les données (ElFashny, 2002). En outre, comme pour les données d'aéroports, dès qu'un site est trop éloigné des stations de mesure, le problème de caractérisation du climat givrant réapparaît. Finalement, cette base de données ne peut être consultée librement ; il est nécessaire de faire une demande auprès d'Hydro-Québec.

## **1.2.2 Problématiques de la caractérisation du climat givrant**

Avec l'accès à des atlas ne décrivant que les précipitations givrantes, un nombre d'aéroports et de stations de mesure limité et des instruments de mesure qui ne sont pas toujours fiables, le problème de la caractérisation du climat givrant d'un site n'est que partiellement résolu. La présente recherche se penche donc sur deux aspects de la caractérisation du givrage atmosphérique. Le premier aspect à étudier est la mesure *in situ* du givrage atmosphérique. Le deuxième aspect est la modélisation du givrage atmosphérique à l'aide de données météorologiques standard.

### **1.2.2.1 Mesure du givrage atmosphérique**

Pour mesurer le givrage atmosphérique, la norme ISO 12494 recommande l'utilisation d'un instrument de passif cylindrique sur lequel il est nécessaire d'effectuer des mesures manuellement (l'instrument est un cylindre sur lequel les accrétions de glace et de givre sont obser-



vées et notées régulièrement). Pour les instruments automatisés, plusieurs rapports et documents (Fikke *et al.*, 2007; Laakso *et al.*, 2003b; Peltola *et al.*, 2005; Tammelin *et al.*, 2005), montrent qu'il n'existe pas de méthode ou d'instrument de référence, que les résultats de différentes méthodes ou instruments peuvent être divergents, et qu'un détecteur fiable adapté au domaine de l'éolien doit être développé, car la plupart des détecteurs de glace sur le marché ont été développés à des fins météorologiques ou aéronautiques.

Le chapitre 2 du présent mémoire passe donc en revue les possibilités d'instrumentation pour la mesure du givrage atmosphérique dans le but de monter un banc d'essai. Le chapitre résume les résultats d'études ou de documents qui évaluent la performance des instruments de mesure du givrage atmosphérique ainsi que la performance de méthodes de mesure indirectes. Le choix d'instruments et de leur disposition sur une tour de mesure est aussi détaillé.

### **1.2.2.2 Modélisation du givrage atmosphérique**

Un autre défi est la modélisation du givrage atmosphérique à partir de données météorologiques standard. À l'annexe D de la norme ISO 12494, on recommande une démarche à suivre pour modéliser le givrage atmosphérique. La norme explique que l'avantage de cette approche est que les données météorologiques sont généralement disponibles pour de longues périodes avec une couverture spatiale relativement bonne. Toutefois, il est aussi expliqué que la corrélation entre ce type de données et les phénomènes de givrage atmosphérique peut être faible. Cela mène à définir l'autre objectif du mémoire, qui est d'étudier la modélisation des périodes de givrage atmosphérique. L'objectif peut être divisé en trois étapes :

1. La mise en place d'une méthodologie d'évaluation quantitative de modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique ;
2. L'évaluation de modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique, et ;
3. L'utilisation de l'un de ces modèles pour une première tentative de cartographie des heures moyennes annuelles de givrage atmosphérique.

La prochaine section décrit les diverses manières de modéliser les périodes de givrage atmosphérique qui se trouvent dans la littérature.

### 1.3 Modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique

En fonction des auteurs, du type de données disponibles et de l'application (éolien, structural, transport aérien, transport d'électricité, etc.), plusieurs modèles d'estimation des périodes de givrage atmosphérique ont été étudiés. Certains, très simples, utilisent uniquement un type de données et seulement deux paramètres météorologiques, alors que d'autres mettent une variété de sources de données et plusieurs paramètres météorologiques à contribution. Ce qui suit décrit les recherches qui se limitent à une petite quantité de sources de données et de paramètres météorologiques. Toutefois, il existe des modèles bien plus complexes, par exemple le « Current Icing Potential » (CIP) (Bernstein *et al.*, 2005). Ce modèle combine des données de satellites, radars, des rapports de pilotes, des données de surface, des données sur la foudre et finalement, un modèle de prévision numérique du temps (PNT).

#### 1.3.1 Données des modèles de PNT

Les modèles de prédiction des événements de givrage atmosphérique cités ici font principalement usage de données météorologiques de stations météo ou de données de modèles de PNT. Les modèles de PNT, comme le dit leur nom, font de la prévision numérique du temps. Ils intègrent une grande quantité de données météo en provenance de radars, de rapports de pilotes, de radiosondes, de satellites et bien d'autres, afin de calculer, en premier, des données d'*analyse*. Les données d'analyse sont une description tridimensionnelle de l'état de l'atmosphère aussi exacte que possible pour une zone donnée, à un temps donné (LeBot et Lassegues, 2004). Une fois cette représentation de l'état de l'atmosphère obtenue, les modèles ont leur point de départ pour procéder à la prévision du temps et pour obtenir des *prévisions*. Avec le temps, les modèles de prévision numérique évoluent et par conséquent, les données d'analyse évoluent aussi. Pour cette raison il est utile de réanalyser plusieurs années de données avec un modèle fixe, de manière à obtenir une base de données homogène, représentant les états successifs de l'atmosphère pendant plusieurs années. Ce sont les données de *réanalyse*.

#### 1.3.2 Modèles d'estimation des périodes de givrage atmosphérique

Dans ce qui suit, les différents modèles sont abordés selon les paramètres météorologiques utilisés. Des modèles qui utilisent l'humidité relative, la hauteur des nuages, la nébulosité et la visibilité, la teneur en eau liquide et la teneur en eau surfondue et des données de précipitations sont décrits. Tous les modèles utilisent aussi le paramètre de température de l'air.



### 1.3.2.1 Humidité relative

Une des approches visant à identifier les périodes de givrage atmosphérique est d'utiliser les mesures de température et d'humidité relative. Lorsqu'il fait sous zéro et que l'humidité relative est très élevée (e.g. 95 % ou plus), certains, cités ci-dessous, ont considéré qu'il y a givrage atmosphérique.

Le modèle utilisant la température et l'humidité relative a été étudié dans le cadre d'une étude sur diverses méthodes de détection des événements de givrage atmosphérique (Säntti *et al.*, 2003). L'étude a montré qu'il peut, pour les sites étudiés, y avoir du givrage atmosphérique même si l'humidité relative est inférieure à 90 %, et que les phénomènes de précipitations givrantes se produisent souvent à des pourcentages d'humidité relative inférieurs à 90 %.

Un autre exemple d'utilisation de ce type de modèle est le travail de Schultz et Politovich (1992) sur le givrage atmosphérique en vol. Les auteurs expliquent de quelle manière ils ont utilisé des données de prévision d'un modèle de PNT américain, appelé le « Nested-Grid Model » pour automatiser une procédure de prévision du givrage atmosphérique pour le domaine de l'aéronautique. Leur approche a consisté à utiliser 22 889 rapports de pilotes sur le givrage atmosphérique en vol pour valider une méthode d'identification des périodes de givrage atmosphérique d'après les prévisions de température et d'humidité relative du modèle. La résolution spatiale horizontale du modèle est de 214 km sur la longitude (du nord au sud) par 139 km sur la latitude (d'est en ouest) à 40° de latitude.

Schultz et Politovich (1992) ont désigné deux classes de givrage atmosphérique ; pour la première il y a givrage atmosphérique lorsque la température se trouve entre 0 et -20°C avec une humidité relative supérieure à 50 %, et pour la deuxième, il y a givrage atmosphérique lorsque la température se trouve entre -2 et -15°C avec une humidité relative supérieure à 65 %. En utilisant les limites de la première classe, une moyenne de 76.6 % des événements signalés par les pilotes ont été détectés et avec les limites de la deuxième classe, ce sont 52.3 % des événements qui ont été détectés. Puisque les auteurs ne possédaient pas de données pour les périodes de non-givrage, il n'a pas été possible de calculer le pourcentage d'événements de givrage atmosphérique prédits par la méthode qui ne se sont, en réalité, pas produits (Schultz et Politovich, 1992).

LeBot et Lassegues (2004) sont deux autres chercheurs qui se sont penchés sur la possibilité d'utiliser des données numériques pour la détection du givrage atmosphérique. Ils ont appli-



qué le modèle de température et d'humidité relative à deux différents ensembles de données numériques et ont comparé les résultats entre eux et avec les résultats du CIP.

Le premier ensemble de données numériques était le ERA-40, des données de réanalyse du « European Center for Medium range Weather Forecasting » (ECMWF) disponibles sur toute la surface du globe à une résolution spatiale horizontale de 110 km à l'équateur. Les auteurs ont appliqué le modèle à 13 ans de données en identifiant un index allant de zéro à un, zéro ne signifiant aucun risque de givrage atmosphérique et un signifiant un très haut risque de givrage atmosphérique. Ils ont considéré que les conditions les plus favorables au développement du givrage atmosphérique sont des températures entre 0 et -15°C et une humidité relative supérieure à 80 %. Ensuite, LeBot et Lassegues (2004) ont appliqué le même modèle à des données d'analyse d'un modèle opérationnel appelé ARPEGE de Météo-France. La résolution de ce modèle est, au mieux, de 50 km, et ce, sur la zone d'Europe de l'Ouest.

Les résultats du modèle tel qu'appliqué aux deux ensembles de données numériques sont décrits comme similaires aux résultats du CIP pour l'ensemble de l'Europe (LeBot et Lassegues, 2004). Les auteurs stipulent qu'étant donné le manque d'observations régulières et homogènes sur le givrage atmosphérique à l'échelle globale, l'utilisation de données numériques d'analyse et de réanalyse peut être une manière d'identifier les zones dans le monde qui sont les plus propices au givrage atmosphérique et d'étudier les variations saisonnières du phénomène.

### **1.3.2.2 Humidité relative et radiation solaire**

Cattin *et al.* (2007), dans le cadre d'une recherche sur la détection du givrage atmosphérique pour l'exploitation d'énergie éolienne, ont utilisé le modèle de température et d'humidité relative en combinaison avec un troisième paramètre, la radiation solaire. Sur le site à l'étude, le type de givrage atmosphérique le plus fréquent est le givrage en nuage. En utilisant la radiation solaire, les auteurs ont calculé la température du ciel qui, lorsque comparée avec la température de l'air, donne une indication du niveau des nuages. Quand la hauteur de la base des nuages est supérieure à la hauteur de référence (e.g. hauteur du moyeu d'une éolienne), la température du ciel est inférieure à la température de l'air au moyeu. Toutefois, s'il y a un nuage à la hauteur du moyeu, les deux températures sont similaires. Ainsi, Cattin *et al.* (2007) ont défini les périodes de givrage comme les périodes pendant lesquelles la température de l'air a été négative, l'humidité relative plus grande ou égale à 95 %, et la différence entre la température de l'air et la température du ciel de moins de deux degrés. Les auteurs

affirment que les premiers résultats de cette méthode semblent indiquer une amélioration dans la détection de givrage atmosphérique sur le site.

### **1.3.2.3 Hauteur des nuages, visibilité et nébulosité**

Lorsque des données un peu plus détaillées sont disponibles, généralement aux aéroports, il est possible de combiner les mesures de température, de visibilité ou de nébulosité. Makkonen et Ahti (1994), dans l'élaboration d'un atlas finlandais du givrage atmosphérique, ont identifié les périodes d'existence de nuages ou de brouillards givrants en détectant les moments où les températures ont été négatives et où la hauteur des nuages a été inférieure à la hauteur du point d'intérêt. C'est ce modèle que recommande la norme ISO 12494.

Une autre étude, celle de Sundin et Makkonen (1998), a utilisé cette approche, mais en fixant une limite inférieure de température à  $-15^{\circ}\text{C}$ , pour s'assurer de ne pas inclure les nuages qui contiennent une importante quantité de cristaux de glace. Cette dernière étude visait à estimer les charges qu'exercent les accrétions de glace sur une tour de télécommunication en treillis. Les auteurs ont, en plus d'identifier les événements de givrage atmosphérique, estimé avec des modèles simples les charges que ces événements pourraient exercer sur la tour. Ils ont comparé leurs résultats avec des mesures effectuées sur la tour en question de 1988 à 1994. Sundin et Makkonen (1998) écrivent que les périodes de givrage atmosphérique et les charges estimées correspondent raisonnablement bien avec les périodes mesurées et fournissent des graphiques qui montrent de quelle manière leur modèle concorde avec les mesures.

L'élaboration de l'atlas du givrage atmosphérique européen a aussi utilisé une approche basée sur la hauteur des nuages et la visibilité. La première version de l'atlas, nommée la version « WECO » et publiée en 1998, a considéré que la formation de givre a lieu lorsque la température de l'air est sous le point de congélation pour les 200 m le plus près du sol et lorsque la hauteur des nuages est inférieure à 200 m (Dobesch *et al.*, 2003). Il a ensuite été question de réviser cette méthode et l'atlas actuel a été élaboré en considérant qu'un événement de givre a lieu lorsque la température de l'air est sous le point de congélation pour les 200 m le plus près du sol, et que soit la hauteur des nuages est inférieure à 200 m, soit la visibilité horizontale est inférieure à 300 m (cette version est appelée « WECO + VIS300 ») (Dobesch *et al.*, 2003). Il est intéressant de mentionner que c'est le seul atlas à avoir été conçu spécifiquement pour l'industrie éolienne. Finalement, les documents qui présentent l'atlas et la méthodologie utilisée pour le réaliser (Dobesch *et al.*, 2003; Tammelin *et al.*, 2005) n'abordent pas la question de la validation du modèle. Ils précisent toutefois que le modèle représente pauvrement le climat



givrants des Alpes et autres montagnes. Finalement, ils mentionnent aussi que des améliorations peuvent être apportées en considérant la longitude, la latitude et l'altitude au-dessus du niveau de la mer en plus des paramètres météorologiques.

Dans un compte-rendu de conférence, Tallhaug (2003) a comparé quelques modèles d'estimation des événements de givrage atmosphérique. Sur un site en haut d'une colline en Norvège sont installés certains instruments de mesure et d'autres données, comme de l'information sur les nuages, proviennent d'un aéroport à dix kilomètres du site. Un des modèles étudiés par Tallhaug indique qu'un événement de givrage atmosphérique a lieu lorsqu'il y a présence de nuages sur la colline et lorsque la température est sous le point de congélation. Un autre modèle est semblable, mais précise qu'il faut une couverture nuageuse d'au moins six huitièmes du ciel. La validation des modèles a été faite avec les caméras installées sur le site. Tallhaug écrit qu'il semble n'y avoir qu'une corrélation partielle entre le givrage atmosphérique au site et les observations sur les nuages (Tallhaug, 2003). L'auteur a aussi regardé la modélisation du givrage atmosphérique en utilisant l'humidité relative. Une comparaison sur un mois des trois différents modèles (deux qui utilisent des données sur les nuages et un qui utilise l'humidité relative) montre que chaque modèle indique un nombre d'heures de givrage atmosphérique différent.

#### **1.3.2.4 Teneur en eau liquide et teneur en eau surfondue**

Hošek (2007) a étudié la possibilité d'utiliser le paramètre de teneur en eau liquide (en combinaison avec la température de l'air) pour identifier des périodes de givrage atmosphérique. Il a appliqué ce modèle à deux types de données numériques. Dans un premier temps, il a utilisé les données de réanalyse globale ERA-40, mentionnées précédemment. Il a comparé ses résultats à deux événements connus de givrage atmosphérique et, lors de ces événements, la valeur de la teneur en eau liquide donnée par les données ERA-40 était assez importante pour indiquer du givrage atmosphérique. Toutefois, il explique que le nombre de fausses prédictions était trop élevé. Hošek a ensuite appliqué ce même modèle à des prévisions d'une résolution de 9 km issues du modèle numérique MM5. Il conclut qu'avec ce modèle, il est possible de prévoir les événements de givrage atmosphérique jusqu'à un certain point (sans aller plus en détail).

Nygaard *et al.* (2007) ont fait le même genre de travail, mais en utilisant un modèle qui donne comme paramètre de sortie la teneur en eau surfondue - la masse d'eau surfondue par unité de volume. Le modèle de PNT utilisé est le « Weather Research and Forecasting » (WRF). Ils



ont comparé la teneur en eau liquide mesurée lors d'événements de givrage au mont Ylläs, en Finlande, à la teneur en eau surfondue donnée pour le modèle WRF. Ils ont effectué la comparaison pour différentes résolutions horizontales du modèle WRF : 13.2 km, 3.3 km et 0.825 km. Les résultats démontrent que la résolution horizontale utilisée influence beaucoup la qualité des résultats, et que les résultats à la résolution de 0.825 km sont assez bons. Les auteurs ne disent pas si le modèle a prédit la présence de teneur en eau surfondue à des moments où il n'y a pas eu de givrage.

### **1.3.2.5 Précipitations**

Une autre approche consiste à détecter toutes les occurrences de précipitations ayant lieu à des températures sous le point de congélation. On présume alors qu'il y a précipitations verglaçantes (Laakso et Peltola, 2003). La norme ISO 12494 recommande de détecter les occurrences de précipitations givrantes soit en utilisant des observations de précipitations givrantes, soit en identifiant les précipitations ayant lieu à des températures de bulbe humide négatives.

### **1.3.3 Bilan des modèles d'estimation des périodes de givrage atmosphérique**

Des modèles faisant usage de différentes variables météorologiques ont été étudiés et utilisés pour modéliser le givrage atmosphérique. Les variables utilisées en combinaison avec la température de l'air sont l'humidité relative, la radiation solaire, la hauteur des nuages, la visibilité, la nébulosité, la teneur en eau liquide et la teneur en eau surfondue. Le tableau 2.1 à la page 47 résume ces modèles. Ils ont été appliqués soit à des données de stations de mesure météorologiques, soit à des mesures faites directement sur un site, soit à des données de PNT. Les modèles mentionnés ci-dessus sont ceux qui utilisent un nombre restreint de données météorologiques et en général, une seule source de données.

En général, dans les études citées, les résultats des modèles ont été comparés à des observations de givrage, mais les prédictions de non-givrage n'ont pas toujours été comparées à des observations de non-givrage. Il n'est donc pas possible de savoir si les modèles ont prédit plus de givrage qu'il y en a réellement eu. C'est le cas de l'étude de Schultz et Politovich (1992), où les comparaisons ont été faites avec des rapports de givrage de pilotes (les pilotes ne rapportent pas toujours les occurrences de non-givrage). Dans le cas de Nygaard *et al.* (2007), les auteurs ont pris des événements de givrage atmosphérique connus et comparé leurs caractéristiques avec les résultats du modèle qu'ils ont utilisé, mais n'ont pas mentionné ce que donne le modèle lorsqu'il n'y a pas d'observations de givrage atmosphérique. En outre, dans

une bonne partie des recherches, les comparaisons sont faites pour un petit nombre d'observations ou pour un ou deux sites seulement. Il est aussi important de noter que certaines des comparaisons sont d'ordre qualitatives. Ainsi, même si les études mentionnées ci-dessus fournissent une grande quantité d'information sur les modèles testés, elles ne donnent pas un portrait complet des performances de ces modèles. De plus, peu d'études comparent entre eux différents modèles d'estimation des périodes de givrage atmosphérique.

À la lumière de tout ce qui a été dit, il est donc pertinent de mettre en place une méthodologie d'évaluation quantitative des modèles de prédiction des événements de givrage atmosphérique. Ensuite, différents modèles peuvent être évalués avec cette méthodologie.

Afin de savoir quels modèles peuvent être évalués, il importe de savoir quelle base de données sera utilisée, et quels paramètres météorologiques y sont disponibles. La revue des différentes bases de données constitue la prochaine section. Cette revue est aussi utile pour identifier des données de validation.

## **1.4 Données météorologiques disponibles au Québec**

Il existe différentes sources de données météorologiques au Québec. Il y a les stations de mesure régulières d'Environnement Canada et les stations de mesure des aéroports. Il existe aussi des données de radiosondes disponibles à quelques endroits et, finalement, il existe des données de modèles de PNT.

### **1.4.1 Stations météo d'Environnement Canada**

Environnement Canada possède plusieurs stations météo à travers le pays où est mesurée une variété de paramètres météorologiques. Au Québec, en date de janvier 2008, un total d'environ 60 stations de mesure d'Environnement Canada enregistraient des données chaque heure (Environnement Canada, 2008b). Ce chiffre exclut les stations qui se situent aux aéroports, qui sont décrites plus bas. La plupart des stations mesurent la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent, la direction du vent, le point de rosée et la pression.

Les données des stations de mesure qui peuvent servir pour les modèles résumés plus haut sont la température et l'humidité relative. Avec uniquement des données de ces stations, il ne sera possible que d'évaluer le modèle utilisant ces deux paramètres.



### 1.4.2 Stations météo d'Environnement Canada et de Nav Canada

Les données météorologiques d'aéroports sont mises à la disposition du public par Environnement Canada et Nav Canada. Cette dernière est une société privée qui fournit des services de contrôle de la circulation aérienne, de l'information météorologique aux aéroports, des services de consultations et des aides à la navigation (Nav Canada, 2008). Les données disponibles incluent les données METAR (une contraction de « **ME**TEorological **Air**port **R**eport »). Ce sont ces données qui décrivent le temps aux aéroports chaque heure. Au Québec, en date de janvier 2008, un total d'environ 39 stations de mesure enregistraient des données aux divers aéroports de la province (Environnement Canada, 2008b). Certains n'enregistrent des données que pendant le jour (par exemple, l'aéroport de Puvirnituk n'enregistre des données qu'entre 7h00 et 17h00) (Environnement Canada, 2008b). Les données METAR donnent la vitesse du vent, la visibilité, la portée visuelle sur la piste, la météo, la nébulosité (hauteur des nuages), la température de l'air et le point de rosée, l'altimètre, le temps récent et le cisaillement. Il y a aussi un espace pour des remarques. La figure 1.9 montre comment sont présentées les données météorologiques sur le site web de Nav Canada. Toutes les informations sont résumées dans la première case de la figure sous le format METAR et elles sont ensuite écrites en langage standard dans les autres cases de l'image.

Les données d'aéroport enregistrent les événements de givrage atmosphérique. Ceux-ci sont donnés dans l'espace « METEO » de la figure 1.9, et il peut aussi y avoir des remarques qui se rapportent au givrage atmosphérique. Donc, pour obtenir de l'information sur le givrage atmosphérique à partir des données d'aéroports, il n'est pas nécessaire de procéder à l'application de modèles d'estimation des périodes de givrage atmosphérique. Ces données peuvent donc servir à la validation de modèles. Cependant, il est aussi possible d'utiliser le point de rosée (qui permet d'obtenir l'humidité relative), la visibilité et la hauteur des nuages afin de tester différents modèles.

### 1.4.3 Données de radiosondes

Une radiosonde est une station météo mobile comprenant quelques instruments de mesure et qui est transportée par un ballon généralement gonflé d'hélium. Les radiosondes donnent la pression atmosphérique, la hauteur à partir du sol, la température, le point de rosée, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent, l'eau dans les nuages (la masse d'eau par kilogramme d'air) (University of Wyoming, 2007). Les données sont enregistrées à plusieurs reprises pendant l'ascension de la sonde, et sont donc considérées comme une description de



MONTREAL/PIERRE-ELLIOTT-TRUDEAU INTL/QC

METAR CYUL 151900Z 03019KT 3/4SM R06R 5500FT U R06L/6000FT U -SN DRSN OVC009 M10/M12 A2987 RESN REBL SN RMK SN6NS2 /S03/ SLP117=		
METAR	LIEU CYUL - MONTREAL/PIERRE- ELLIOTT-TRUDEAU INT	DATE - HEURE 15 JANVIER 2007 - 1900 UTC
VENT 30 VRAIS @ 19 NOEUDS	VISIBILITE 3/4 MILLE TERR.	PORTEE VISUELLE DE PIS 1 E PISTE 6 R PORTEE 5500 PI TENDANCE A LA HAUSSE PISTE 6 L PORTEE 6000 PI TENDANCE A LA HAUSSE
METEO NEIGE FAIBLE POUDRERIE BASSE	NEBULOSITE CIEL COUVERT 900 PI	TEMP / PT DE ROSEE -10 C / -12 C
ALTIMETRE 29.87 PO HG	TEMPS RECENT NEIGE MODEREE	CISAILLEMENT
REMARQUES RMK SN6NS2 /S03/ SLP117= NUAGE AVEC OPACITE: NEIGE 6/8 NIMBOSTRATUS 2/8 PRESSION AU NIVEAU DE LA MER: 1011.7 hPa		

**Figure 1.9 Exemple de données METAR.** (Tirée de Nav Canada, 2008)

Source : Cette figure est tirée de la page « Prévisions et observations / METAR - TAF » du site web de Nav Canada, 2008.

la météo pour une coupe verticale dans l'atmosphère à un moment donné. Ces données sont disponibles deux fois par jour, à midi et à minuit, heure universelle.

Les données enregistrées qui peuvent servir à l'évaluation de modèles d'estimation des périodes de givrage atmosphérique sont la température de l'air, l'humidité relative et l'eau dans les nuages (i.e. la masse d'eau par kilogramme d'air, qui peut être convertie en teneur en eau liquide) (University of Wyoming, 2007). De plus, ces données sont intéressantes dans la mesure où elles sont disponibles pour différentes élévations à partir du sol, permettant d'estimer le climat givrant à la hauteur du moyeu d'une éolienne. Il n'y a cependant que peu d'endroits au Québec où sont lancées des radiosondes, et ce sont à certains aéroports (University of Wyoming, 2007).

#### 1.4.4 Données d'analyse d'Environnement Canada

Avec son modèle de PNT opérationnel, le « Global environnement multiéchelle » (GEM), Environnement Canada génère des données d'analyse. Les paramètres météorologiques disponibles sont (Plante, 2007) :

— la pression à la surface (mb) ;

- la composante U du vent (selon l'axe des X) (noeuds) ;
- le composante V du vent (selon l'axe des Y) (noeuds) ;
- la température de l'air ( $^{\circ}\text{C}$ ) ;
- l'humidité spécifique ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) ;
- la hauteur géopotentielle (m) ;
- la température virtuelle ( $^{\circ}\text{C}$ ) ;
- l'écart du point de rosée ( $^{\circ}\text{C}$ ) ;
- la température de la mer (K) ;
- la profondeur de neige (cm), et ;
- l'albédo.

Les données d'analyse régionale sont disponibles, depuis 2004, à une résolution temporelle de six heures, une résolution spatiale horizontale de 35 km et une résolution spatiale verticale de 58 niveaux isobariques (Environnement Canada, 2005). Pour avoir des données sur une plus longue période, il est possible d'utiliser les données depuis 1997, année pendant laquelle le modèle GEM régional remplace l'ancien modèle de prévision numérique régional (Environnement Canada, 2005). En 1997 le modèle GEM avait une résolution spatiale horizontale de 100 km avec 28 niveaux isobariques (Environnement Canada, 2005).

Avec les paramètres disponibles, il n'est possible d'estimer les occurrences de givrage atmosphérique que par le modèle utilisant la température et l'humidité relative. De surcroît, la résolution spatiale et temporelle des données n'est pas uniforme dans le temps.

#### **1.4.5 Données de réanalyse du « National Centre for Environmental Prediction »**

Le « National Center for Environmental Prediction » (NCEP) aux États-Unis produit une base de données de réanalyse régionale continuellement mise à jour, la Réanalyse régionale d'Amérique du Nord (RRAN). Les données de réanalyse sont générées par une version de 2003 du modèle de PNT régional Eta (Mesinger *et al.*, 2006). Les données sont disponibles à partir de 1979, et ce, pour l'ensemble de l'Amérique du Nord (NCEP, 2008). Elles ont une résolution spatiale horizontale de 32 km et une résolution spatiale verticale de 45 niveaux isobariques (Mesinger *et al.*, 2006). La résolution temporelle est de trois heures (NCEP, 2008). Les champs disponibles pour la base de données de la RRAN sont multiples. Ceux qui peuvent être d'intérêt dans l'optique de l'étude du givrage atmosphérique sont la température de l'air, l'humidité relative, la visibilité, la hauteur des nuages, l'eau dans les nuages et une prévision de trois heures de la pluie verglaçante.

#### 1.4.6 Autres données numériques

Il est important de mentionner qu'il existe d'autres données de modèles de PNT qui recouvrent une partie ou l'ensemble de la province. Il y a deux réanalyses globales qui recouvrent la totalité du globe. Celles-ci sont la ERA-40 (European Centre for Medium Range Weather Forecasts, 2003), mentionnée plus tôt, et le « Global Reanalysis » du NCEP (Kanamitsu *et al.*, 2002). Ils ne sont pas considérés ici, car leurs résolutions spatiales horizontales sont beaucoup moins fines que celles des données du modèle GEM ou de la RRAN. Il existe aussi les données d'analyse « Rapid Update Cycle » du NCEP (National Ocean and Atmospheric Administration, 2003). Ces données n'ont pas non plus été considérées, car elles ne recouvrent qu'une partie du territoire québécois et canadien.

#### 1.4.7 Bilan sur les données disponibles

Il a été question de passer en revue les différents types de données météorologiques disponibles pour le Québec qui pourraient servir à l'évaluation de modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique. Cette évaluation requiert deux types de données : des données pour l'application des modèles et des données pour la validation des modèles. Le premier type de données devrait contenir de l'information sur un assez grand nombre de paramètres météorologiques, permettant, idéalement, d'évaluer la performance de plusieurs des modèles décrits dans la section 1.3. Ces données doivent aussi être disponibles sur une période suffisamment longue pour permettre des analyses de moyennes et des extrêmes. En fonction du site, la norme ISO 12494 stipule que cela peut représenter quelques années ou quelques décennies. De plus, les données devraient avoir une résolution spatiale relativement fine afin qu'il soit facile d'évaluer le climat givrant d'un site sans recourir à des interpolations ou à des extrapolations de données sur de longues distances.

Le second type de données doit contenir des observations sur les périodes de givrage qui ont réellement eu lieu. Il faut que ces données contiennent de l'information à la fois sur les précipitations givrantes et sur les brouillards ou nuages givrants. À partir des descriptions des bases de données ci-dessus, les seules données qui puissent être utilisées pour la validation sont les données d'aéroport, qui indiquent les événements de givrage atmosphérique. Il serait aussi possible d'utiliser les données des glacimètres d'Hydro-Québec dont il a été question dans la sous-section sur les ressources existantes 1.2.1.2. Mais, les données d'aéroport sont utilisées, car leur résolution temporelle est meilleure et parce que ce sont des données publiques qui peuvent être téléchargées ou commandées.



Pour ce qui en est du premier type de données, les données de la RRAN sont retenues. Elles sont disponibles pour une longue période de temps (28 ans), elles décrivent l'évolution d'une très grande variété de paramètres météorologiques et leur résolution spatiale est relativement fine (32 km). Cette base de données permet d'évaluer la performance des modèles utilisant la température de l'air en combinaison avec l'humidité relative, la hauteur de la base des nuages, la visibilité, la teneur en eau liquide et aussi avec les prévisions de précipitations verglaçantes. De plus, les points de maille sont répartis uniformément sur le territoire, contrairement aux données de stations de surface qui sont généralement concentrées dans les régions plus peuplées. De cette manière, peu importe le site que l'on pourrait chercher à étudier, il ne sera jamais très loin d'un point de maille. Enfin, des données sont aussi disponibles pour différents niveaux isobariques, permettant potentiellement d'effectuer des analyses non seulement à la surface, mais à différentes hauteurs au-dessus de la surface du sol.

## 1.5 Bilan

Le givrage atmosphérique est un phénomène qui provoque des accumulations de glace sur des structures. Il existe différents types de givrage atmosphérique qui ont lieu sous différentes conditions. La fréquence des événements de givrage atmosphérique peut varier significativement entre deux sites et d'une année à l'autre. La norme ISO 12494 et le rapport « NEW ICETOOLS » recommandent des démarches à suivre pour caractériser le climat givrant d'un site. Seulement, ces recommandations ne sont pas toujours faciles à suivre, et ce, pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les instruments de mesure du givrage atmosphérique ne sont pas entièrement fiables. Ensuite, les mesures qui existent n'ont pas la résolution spatiale nécessaire pour être utilisées peu importe l'emplacement du site étudié. En outre, il existe des cartes illustrant la répartition géographique des heures moyennes annuelles de précipitations givrantes, mais il n'y a pas d'équivalent pour les brouillards et les nuages givrants. Enfin, il existe des modèles qui permettent de prédire les événements de givrage atmosphérique à l'aide de données météo standard, mais la performance de ces modèles n'est pas toujours bien comprise.

Pour ces raisons, les prochains chapitres s'attardent sur deux des problématiques de la caractérisation du climat givrant d'un site. L'un des objectifs du mémoire est de concevoir un banc d'essai qui servira à l'étude de la mesure du givrage atmosphérique. L'autre objectif consiste à évaluer des modèles simples de prédiction des périodes de givrage atmosphérique. Pour ce faire, une méthodologie d'évaluation de ce type de modèle doit être établie. Ensuite, une évaluation quantitative de différents modèles peut être réalisée. Puis, finalement, un des modèles

peut être sélectionné pour cartographier de manière préliminaire le givrage atmosphérique pour une partie du Québec.

## **CHAPITRE 2**

### **CONCEPTION D'UN BANC D'ESSAI**

Le présent chapitre est voué à la conception d'un banc d'essai pour la mesure et la détection du givrage atmosphérique. Le banc d'essai a été installé sur une tour de mesure existante d'un parc éolien à Baie-des-Sables en Gaspésie. Les instruments et les données de ce banc d'essai appartiennent au professeur Christian Masson de l'ÉTS, au partenaire industriel du projet de maîtrise, Hélimax énergie inc., et au propriétaire de parc éolien Cartier énergie éolienne.

Le chapitre est structuré en trois sections principales. Dans un premier temps, il est question de passer en revue les instruments de mesure et de détection du givrage atmosphérique et les méthodes indirectes de mesure et de détection. Dans un deuxième temps, le choix d'instruments pour le banc d'essai est expliqué et finalement, la disposition des instruments sur la tour de mesure est décrite.

#### **2.1 Mesure et détection du givrage atmosphérique**

La mesure du givrage atmosphérique n'est pas toujours facile et il n'existe aucun instrument de mesure ou méthode indirecte de mesure qui est entièrement fiable. Dans un contexte de caractérisation du climat givrant d'un site, il est malgré tout pertinent de comprendre quels instruments et quelles méthodes de mesure indirectes existent, et quelles informations il est possible d'en tirer. Ce qui suit présente donc les instruments de mesure, automatisés et passifs, ainsi que les méthodes de mesure indirectes du givrage atmosphérique. Dans la mesure du possible, un résumé des expériences d'utilisation des instruments et méthodes est fourni.

##### **2.1.1 Instruments de mesure et de détection**

Il existe une variété d'instruments qui détectent le givrage atmosphérique ou qui mesurent directement certaines caractéristiques du givrage atmosphérique. Ce qui suit présente les instruments existants sur le marché et les informations qu'ils permettent d'obtenir. Certains sont des instruments automatisés et peuvent donc être reliés à des systèmes d'acquisition de données, alors que d'autres sont des instruments passifs sur lesquels il faut effectuer des mesures manuellement ou dont on obtient des informations à partir de photos ou vidéos. Finalement, les instruments retirés du marché ou toujours à l'état de prototype ne sont pas mentionnés ici.



### 2.1.1.1 Instruments de mesure automatisés

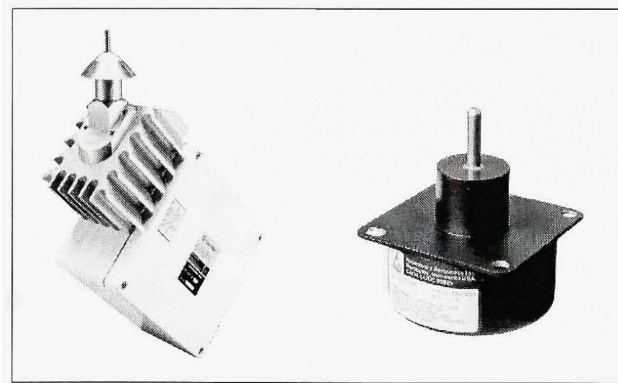
B.F. Goodrich, une compagnie américaine, est un fabricant d'instruments qui commercialise deux détecteurs de givrage atmosphérique pour utilisation au sol, le modèle 0871LH1 et le modèle 0872E3, tous les deux illustrés à la figure 2.1. D'autres modèles de détecteurs sont conçus pour le domaine de l'aviation. Le fonctionnement de tous les modèles de détection de glace B.F. Goodrich est similaire. Tous possèdent une sonde à vibration axiale de 6.35 mm de diamètre et de 25.4 mm de hauteur (Goodrich Corporation, 2002a,b). Cette sonde vibre à une fréquence de 40 kHz en temps normal, lorsqu'il n'y a pas d'accumulation de glace sur la sonde. Toute accumulation de glace modifie la masse de la sonde, ce qui entraîne une diminution de la fréquence de vibration de celle-ci. Lorsque la fréquence de vibration diminue jusqu'à une fréquence prédéfinie, un signal de givrage atmosphérique est émis pendant 60 secondes et marque le début d'une période de dégivrage automatique de l'instrument. La durée de cette période de dégivrage varie selon le modèle. Si, pendant les 60 secondes d'émission du signal de givrage, une seconde accumulation de glace se produit, le capteur émet un deuxième signal de 60 secondes et la sonde recommence son processus de dégivrage. Le mécanisme de dégivrage du modèle 0871LH1 ne dégivre que la sonde (Goodrich Corporation, 2002b) et le dégivrage dure au maximum 25 secondes (Drouin, 2006). Le modèle 0872E3, aussi appelé capteur de pluie verglaçante, possède un mécanisme de dégivrage pour la sonde et son support (pièce de métal directement sous la sonde) (Goodrich Corporation, 2002a). La durée du dégivrage du modèle 0872E3 peut être définie par l'utilisateur, avec une limite maximale fixée à 60 secondes (Drouin, 2006).

Les sondes B.F. Goodrich permettent de mesurer l'intensité de l'accrétion. Elles mesurent aussi la durée du phénomène du givrage atmosphérique. Toutefois, la période d'accrétion est mesurée comme la somme des signaux de 60 secondes émis avec le dégivrage, ce qui ne correspond pas exactement à la période réelle d'accrétion (Claffey *et al.*, 1995).

Des détecteurs de givrage atmosphérique B.F. Goodrich sont en opération à Crow Mountain et Haeckel Hill au Canada (Pinard et Maissan, 2003), sur les stations de mesure de givrage atmosphérique d'Hydro-Québec (voir plus bas), au mont Washington et au mont Mansfield (Ryerson, 1988), à Oberzeiring en Autriche (Tauernwindpark) (Säntti et Tammelin, 2002) et à Luosto en Finlande (Tammelin *et al.*, 2005). Finalement, le système d'observation météorologique automatisée (« Automated Weather Observing System » AWOS) du Service météorologique du Canada (SMC) utilise les détecteurs B.F. Goodrich du type 0872E3, tout comme le fait le « United States National Weather Service Automated Surface Observing

System » (ASOS) (Goodrich Corporation, 2002a). Fikke *et al.* (2005) affirment que, de tous les détecteurs de glace, ceux de B.F. Goodrich sont probablement les plus utilisés. Pinard et Maissan (Pinard et Maissan, 2003) considèrent comme très positive leur expérience avec le modèle 0872B12 (fabrication discontinuée) à Haeckel Hill au Yukon et Tammelin *et al.* (2005) qualifient l'instrument prototype 0872J (discontinué (Drouin, 2006)) à Luosto de « fairly reliable » et mentionnent qu'il performe mieux que les autres détecteurs de glace. Par contre à Crow Mountain, Pinard et Maissan (2003) rapportent que le modèle 0871LH1, lors de conditions atmosphériques sévères, ne fonctionne pas adéquatement. Les auteurs supposent que cela est probablement dû au fait que pour ce modèle, seule la sonde est chauffée et la période de dégivrage de 25 secondes est peut-être trop brève pour les conditions atmosphériques du site. Enfin, Cober *et al.* (2001) notent qu'un problème des détecteurs de givre B.F. Goodrich est qu'ils ne réussissent pas à détecter adéquatement le givrage atmosphérique lorsque la température de l'air est près du point de congélation et que la teneur en eau liquide de l'air est élevée. Dans de telles conditions, le signal de sortie de l'instrument ne varie plus en fonction de l'accrétion de glace, et la mesure fournie par l'instrument n'est plus fiable (Mazin *et al.*, 2001).

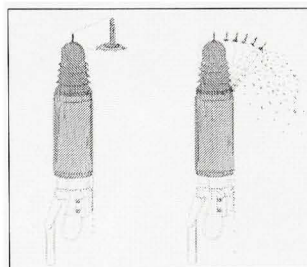
Hydro-Québec a commencé à installer un réseau de détecteurs de givre informatisés depuis 1992, le réseau SYGIVRE, composé de givromètres, aussi appelés « Icing Rate Meter » (Guesdon, 2000). Ce réseau possède au-delà de 30 stations de mesure (Savadjiev et Farzaneh, 2004). Chaque station de mesure comprend une sonde B.F. Goodrich modifiée et une sonde de tem-



**Figure 2.1 Instruments B.F. Goodrich pour applications au sol (modèle 0872E3 à gauche et modèle 0871LH1 à droite).** (Tirés de Goodrich Corporation, 2002a,b)

Source : Ces figures sont tirées des documents Goodrich Corporation, 2002a « Freezing Rain Sensor » et Goodrich Corporation, 2002b « Model 0871LH1 Ice Detector » et sont présentées en première page des documents originaux.

pérature (Laforte *et al.*, 1995). Une des modifications de la sonde B.F. Goodrich touche le format du signal de sortie de l'instrument (voir Laforte *et al.*, 1995 pour plus de détails). L'autre modification touche le support de l'instrument ; on a conçu un bras flexible sur lequel la sonde est posée tel qu'illustré à la figure 2.2 (Laforte *et al.*, 1995). Suite au processus de dégivrage thermique de dix secondes, la sonde subit un dégivrage mécanique pendant lequel elle est secouée pendant quatre secondes (Fikke *et al.*, 2005; Laforte *et al.*, 1995). Cela permet d'enlever l'eau restante du processus de dégivrage thermique (Laforte *et al.*, 1995).



**Figure 2.2** *Illustration de l'instrument B.F. Goodrich modifié.* (Tirée de Fikke *et al.*, 2005)

Source : Cette figure est tirée de Fikke *et al.*, 2005 « Detectors for atmospheric icing » et correspond à la « Figure 2 : The SYGIVRE icing rate meter » présentée en page 3 dans le document original.

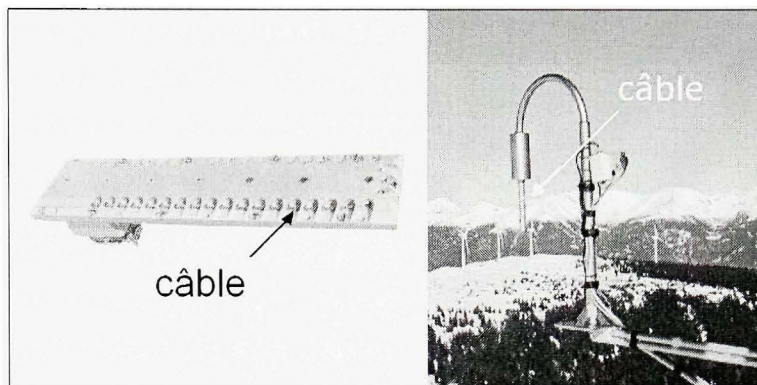
Cet instrument permet de mesurer, exactement comme les sondes B.F. Goodrich originales, la durée et l'intensité du givrage atmosphérique, en fournissant en plus la température de l'air grâce à la sonde de température. Selon Farzaneh et Savadjiev (Farzaneh et Savadjiev, 2005), Hydro-Québec est en train de remplacer les givromètres actuels par une deuxième génération de givromètres (aucune image disponible).

Labko, ou Wavin-Labko Oy, est une entreprise finlandaise. La compagnie commercialise deux séries de détecteurs de glace, soit la série 3200 (LID 3200) et la série 3500 (LID 3500). La série 3500 est conçue à des fins météorologiques et la série 3200 est conçue spécifiquement pour le domaine de l'énergie éolienne et les instruments de cette série peuvent être montés sur la nacelle ou sur les pales d'une éolienne (Wavin-Labko, 2001).

Les deux séries fonctionnent d'après le même principe. La sonde qui détecte le givrage atmosphérique est un câble à travers lequel est envoyée, toutes les quatre secondes, une onde. La figure 2.3 illustre les deux séries des détecteurs Labko et indique l'emplacement de ce câble. L'onde passant par le câble est amortie quand il y a accumulation de glace sur le câble (Laakso et Peltola, 2003). Ainsi, le taux d'accrétion de glace se mesure avec l'amortis-



sement de l'onde (Laakso et Peltola, 2003). Lorsque le signal de sortie est amorti en dessous d'une valeur prédéfinie, il y a dégivrage de la sonde (Wavin-Labko, 2006). Cette valeur prédéfinie peut être modifiée pour mieux adapter l'instrument aux conditions météorologiques de chaque site (Fikke *et al.*, 2005).



**Figure 2.3 Instruments Labko.** (Tirés de Fikke *et al.*, 2005; Wavin-Labko, 2006)

Source : Ces figures sont tirées de Wavin-Labko, 2006 « LID-3210C Ice Detector for Wind Turbines Installation Manual » (présentée en première page dans le document original) et de Fikke *et al.*, 2005 « Detectors for atmospheric icing » (correspond à la « Figure 4 : The Labko ice detector LID-3503 operated by FMI at Tauernwindpark in Austria » présentée en page 5 du document original).

Les instruments Labko permettent, comme les instruments B.F. Goodrich, de mesurer la durée de conditions de givrage atmosphérique et l'intensité du phénomène par le taux d'accrétion. Des instruments Labko sont utilisés à plusieurs sites : au parc éolien de Pori (Laakso *et al.*, 2003a), au parc éolien de Olostunturi (Laakso *et al.*, 2003a), à Pyhänturi (Makkonen, 2003) et à Lusoto (Säntti *et al.*, 2003) (tous les quatre en Finlande), ainsi qu'à Oberzeiring en Autriche (Fikke *et al.*, 2005). Laakso *et al.* (2003a) rapportent que le modèle 3500 (pour fins météorologiques) est plus sensible en terme de détection de glace que le modèle 3200. Säntti *et al.* (2003) mentionnent que son système de chauffage est toutefois insuffisant pour les conditions sévères de Luosto, surtout lorsque les vents y sont forts et la température très basse. Outre cela, il a des difficultés à détecter la glace à des températures près de 0°C (Säntti *et al.*, 2003). Laakso et Peltola (2003) rapportent que la sonde 3500 est trop sensible aux vibrations de la nacelle pour être utilisée directement sur l'éolienne.

Le modèle 3200, quant à lui, est plus robuste et n'est pas sensible aux vibrations d'une éolienne (Laakso *et al.*, 2003a), mais on rapporte d'autres désavantages. À Olostunturi, un délai a été observé entre le début des conditions givrantes et le début de la détection de ces condi-

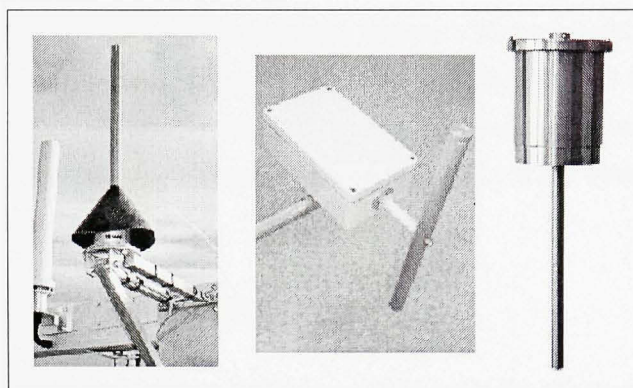
tions par l'instrument (Laakso *et al.*, 2003a). De plus, la période de refroidissement qui suit le dégivrage de l'instrument est parfois très longue (10 minutes ou plus) (Laakso *et al.*, 2003a; Makkonen, 2003). Pendant cette période, l'instrument n'est plus en mesure de détecter de nouvelles accrétions. Ainsi, cela pose problème pour la mesure de la durée du givrage atmosphérique (Laakso *et al.*, 2003a). De plus, à Pyhäntunturi il a été observé que le chauffage est soit insuffisant, soit le câble est mal placé dans son enceinte chauffante (Makkonen, 2003). Outre cela, l'instrument ne détecte pas très bien la présence de givre quand les gouttelettes qui mènent à sa formation sont très petites (Laakso *et al.*, 2003a). Il détecte mieux la neige et les accrétions plus lourdes (Laakso *et al.*, 2003a).

En République tchèque, une entreprise commercialise aujourd'hui un détecteur de glace cylindrique, le METEO (Fikke *et al.*, 2005), illustré à la figure 2.4. Ce dernier peut être relié à un système d'acquisition et mesure la durée et l'intensité du givrage atmosphérique, ainsi que la température de l'air, la vitesse du vent et sa direction (EGÚ Brno, 2006).

Il existe aussi le « Icemeter », développé par l'Institut des sciences de l'atmosphère de Prague (Fikke *et al.*, 2007). L'instrument, composé d'un cylindre vertical de 48 cm, est illustré à la figure 2.4. La masse de glace est calculée à l'aide d'une jauge à contrainte (Fikke *et al.*, 2007). Il peut mesurer jusqu'à 10 kg de glace. L'instrument est muni d'un système de chauffage de 2 W qui semble adéquat pour les conditions dans lesquelles il a été testé. Cependant, il se peut que cette puissance augmente dans des versions futures. Le chauffage n'est appliqué qu'à la partie reliant le capteur cylindrique au boîtier contenant les appareils électroniques de traitement de signal. L'instrument est illustré à la figure 2.4.

Des exemples de cet instrument ont été installés en République tchèque et Fikke *et al.* (2005) rapportent qu'il performe bien la plupart du temps. Toutefois, il a aussi été utilisé à Guetsch, en Suisse, et Cattin *et al.* (2007) rapportent qu'il n'a pas été possible de le faire fonctionner convenablement.

Le IceMonitor est un détecteur de glace développé par Combitech, une entreprise suédoise. L'instrument, illustré à la figure 2.4 est un cylindre vertical de 30 mm de diamètre qui est libre de tourner autour de son axe (Combitech AB, 2007). Le roulement à billes qui permet la rotation est chauffé et protégé par un cône inversé. L'instrument peut mesurer jusqu'à 50 ou 100 kg de glace (au choix).



**Figure 2.4** À gauche, le METEO, au milieu le Icemeter et à droite, le IceMonitor.  
(Tirées de Cattin *et al.*, 2007; Chum et Vojta, 2005; EGÚ Brno, 2006)

Source : Ces figures sont tirées de EGÚ Brno, 2006 « METEO Automated Icing Monitoring Device » (présentée en première page dans le document original), Chum et Vojta, 2005 « Icemeter » (présentée en première page dans le document original) et de Cattin *et al.*, 2007 « Alpine Test Site Guetsch » (correspond à la « Fig.3 : Combitech IceMonitor installed on the Guetsch test site » présentée en page 2 dans le document original).

Cattin *et al.* (2007) écrivent qu'au site de recherche de Guetsch mentionné précédemment, le cône de protection des roulements à billes a été enlevé par le vent, et que par conséquent, le roulement à billes était recouvert de glace pendant les événements givrants. Il n'a pas été possible de replacer le cône de manière à ne pas influencer les mesures, et donc il n'a pas été possible pour les auteurs d'évaluer la performance de l'instrument.

Une autre compagnie suédoise, HoloOptics, manufacture une série de détecteurs de glace. Ceux-ci détectent la glace grâce à la réflexion d'un rayon infrarouge. Les instruments sont capables de détecter différents types de glace et sont munis d'un système de chauffage (Fikke *et al.*, 2007). La figure 2.5 illustre deux modèles, l'un qui mesure les accrétions de glace dans une seule direction, et l'autre qui permet de les mesurer dans quatre directions.

Toujours au site de recherche en Suisse, Cattin *et al.* (2007) écrivent que le modèle T20 de HoloOptics a eu des fuites d'eau dans la structure, entraînant des dommages au niveau de l'électronique interne. Deux versions révisées de l'instrument ont été installées sans amélioration.

Finalement, la société américaine « New Avionics » manufacture une gamme de produits qui détectent tous les types d'accrétions de glace (New Avionics Corporation, 2008). Deux des instruments sont pour utilisation au sol, et peuvent, selon le fabricant, être utilisés pour détec-



ter les événements de givrage atmosphérique pour un parc éolien. Le mode de fonctionnement est optique ; le givre et la neige atténuent la réponse d'un signal d'un laser infrarouge, alors que le verglas et les précipitations liquides réfractent le signal. L'instrument indique s'il y a ou non givrage atmosphérique, cependant on ne dit pas s'il y a un système de chauffage qui enlève les accrétions de glace.

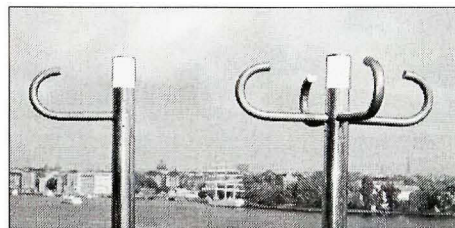
### 2.1.1.2 Instruments de mesure passifs

Les cylindres, en rotation ou non, sont les instruments passifs les plus souvent utilisés, inspirés des recommandations de la norme ISO 12494 mentionnée au chapitre 1.

Le « Finnish Meteorological Institute » (FMI), a fait usage d'un cylindre appelé le « FMI ice cylinder », dans le cadre d'une recherche sur les différentes manières de détecter le givre, à Luosto en Finlande (Säntti *et al.*, 2003). Le cylindre est en aluminium, mesure 20 cm et a un diamètre de 5 cm. Il a été surveillé par caméra pour mesurer la durée et la persistance du givrage atmosphérique (Säntti *et al.*, 2003).

En Allemagne, le service météorologique a effectué des mesures de givrage atmosphérique à 40 endroits différents au pays de 1965 à 1990 à l'aide d'un cylindre (Wichura, 2005). À intervalle de 24 heures, des mesures manuelles ont été faites sur des cylindres de PVC de 35 cm de diamètre et de 1 m de hauteur. Les quantités mesurées étaient la masse de glace, le diamètre du cylindre glacé, la direction dans laquelle l'accrétion a eu lieu, et le type d'accrétion (Wichura, 2005).

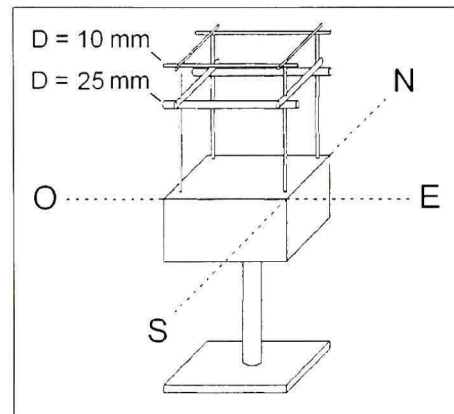
L'ancienne Tchécoslovaquie a aussi effectué des mesures de glace sur des cylindres pendant de nombreuses années (Popolanský *et al.*, 1992).



**Figure 2.5 Instruments de HoloOptics.** (Tirée de Fikke *et al.*, 2007)

Source : Cette figure est tirée de Fikke *et al.*, 2007 « COST 727 : Atmospheric Icing on Structures, Measurements and data collection on icing : State of the Art » et correspond à la « Figure A.46 T26 Icing Rate Sensor single and omni direction versions » présentée en page 96 du document original.

Au Québec, un réseau de stations de mesures passives du givrage atmosphérique a été installé par Hydro-Québec. Les glacimètres, mentionnés au chapitre 1, sont conçus pour étudier le givrage des lignes de transmission d'électricité (Guesdon, 2000). Ils sont composés de huit cylindres et de quatre surfaces faisant face aux quatre points cardinaux comme illustré à la figure 2.6 (Guesdon, 2000). Cette structure est installée à 1.2 m du sol (Laflamme et Périard, 1996). En temps normal, un opérateur effectue des observations sur l'instrument deux fois par jour, à 8 h et 18 h, et plus fréquemment lors de tempêtes (ElFashny *et al.*, 1998). Plusieurs caractéristiques sont notées par l'observateur, soit le type de givrage, l'accumulation sur chaque surface, l'épaisseur de l'accrétion et l'heure de début et de fin de l'accrétion (persistance) (ElFashny *et al.*, 1998).



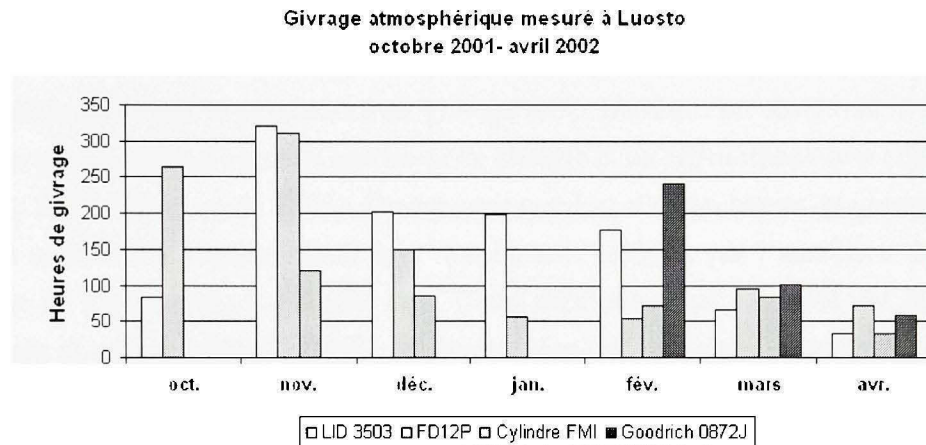
**Figure 2.6** *Instrument passif PIM d'Hydro-Québec.* (Tiré de Yang, 2005)

Source : Cette figure est tirée de Yang, 2005 « Analysis of Rime Ice Accretion at Mont Bélair and Design of Transmission Lines » et correspond à la « Figure 3.4 Hydro-Québec passive ice meter (PIM) » présentée en page 31 du document original.

Le désavantage évident de tout instrument de mesure passif est qu'il faut recueillir les données manuellement ou avec l'aide d'un appareil photo numérique. Les détecteurs passifs ont aussi le désavantage d'être en général très près du sol alors que les câbles électriques et les éoliennes sur lesquels on souhaite mesurer l'effet du givrage atmosphérique sont à des hauteurs plus importantes. Cela est surtout problématique pour le givre, qui peut varier beaucoup avec l'altitude (Guesdon, 2000). Cependant, une inspection visuelle permet d'obtenir plusieurs informations comme le type de givrage ou la direction de l'accrétion.

### 2.1.1.3 Comparaisons des instruments

Il est intéressant de voir comment certains des instruments décrits ici se comparent entre eux. Comme il a été mentionné, il n'existe pas d'instrument de référence et les résultats de différents instruments peuvent être divergents. À titre d'exemple, voici les résultats d'un hiver de mesures à Luosto (figure 2.7). Il est à noter que le détecteur B.F. Goodrich n'a été installé qu'en février.



**Figure 2.7** *Comparaison entre différents instruments de détection du givrage atmosphérique (le FD12P, un capteur de temps, n'est pas décrit dans ce chapitre car sa fonction n'est pas de détecter le givrage atmosphérique).* (Tiré de Sântti *et al.*, 2003 [traduction libre])

Source : Cette figure est tirée de Sântti *et al.*, 2003 « Experience from measurements of atmospheric icing » et correspond à la « Figure 4. Number of icing hours per month measured at the Luosto site during October 2001 - April 2002 using data from different instruments » présentée en page 6 dans le document original.

Les résultats sont si divergents qu'il est écrit dans le rapport « NEW ICETOOLS » (Tammelin *et al.*, 2005) que : « Dû au manque de fiabilité des instruments de mesure, il s'est avéré presque impossible de déterminer la durée des événements givrants à partir des données rassemblées (traduction libre) ». Ces résultats montrent qu'il est difficile d'avoir une mesure fiable du givrage atmosphérique, même avec des instruments de mesure conçus à cette fin.



## 2.1.2 Méthodes indirectes de mesure et de détection du givrage atmosphérique

Il existe aussi plusieurs méthodes indirectes de mesure et de détection du givrage atmosphérique. Il y a bien sûr les modèles de détection d'occurrences de givrage atmosphérique décrits à la section 1.3. À ceux-ci s'ajoutent des méthodes qui s'appliquent à des données météorologiques récoltées pour l'évaluation du potentiel éolien. Ces données ont une période d'échantillonnage plus courte et enregistrent aussi l'écart-type des mesures.

### 2.1.2.1 Différence entre anémomètres chauffés et non chauffés

Il est possible d'estimer la persistance du givrage atmosphérique en observant la différence de mesure de vitesse du vent entre un anémomètre chauffé et un anémomètre non chauffé (Laakso et Peltola, 2003; Sääntti *et al.*, 2003). On suppose que lors d'événements de givrage atmosphérique, les mesures de l'anémomètre non chauffé sont altérées par l'accrétion de glace alors que celles de l'anémomètre chauffé, non. Cette méthode a par exemple été étudiée à Pori en Finlande (Laakso et Peltola, 2003), à Oberzeiring en Autriche (Tammelin *et al.*, 2005), à Haeckel Hill (trois anémomètres) (Pinard et Maissan, 2003) et sur des monts en Nouvelle-Angleterre (Kenyon et Blittersdorf, 1996).

Une des difficultés de cette méthode est de fixer le pourcentage d'erreur entre les deux anémomètres à partir duquel on suppose qu'il y a givrage atmosphérique (Laakso *et al.*, 2003a). À Pori par exemple, cette limite a été fixée à 5 %, donc les périodes pendant lesquelles l'erreur entre les deux anémomètres était plus grande ou égale à 5 % étaient considérées comme périodes d'accrétion ou de persistance (Laakso *et al.*, 2003a). Normalement, on suppose que c'est l'anémomètre non chauffé qui, à cause d'accrétions de glace, indiquera la mesure de vitesse de vent la plus faible. Cependant, il a été observé à Pori en Finlande (Laakso *et al.*, 2003a) et à Oberzeiring en Autriche (Tammelin *et al.*, 2005) que la vitesse lue par l'anémomètre chauffé était parfois celle qui était la plus faible. En outre, à Pori, il a été remarqué que l'erreur entre les deux anémomètres semblait n'être importante qu'au début de la période de givrage et de persistance (Laakso *et al.*, 2003a).

Les auteurs du rapport du FMI, « NEW ICETOOLS » (Tammelin *et al.*, 2005), ont conclu qu'il est difficile de détecter les événements givrants avec cette méthode seulement.

### 2.1.2.2 Variation des écarts-types

La persistance du givrage atmosphérique peut aussi être détectée avec les lectures d'écart-type des anémomètres et des girouettes (Kenyon et Blittersdorf, 1996; Ross, 2002). Dans le domaine de l'éolien, des mesures sont prises à une haute fréquence, et habituellement moyennées sur une période de dix minutes. L'écart-type sur ces dix minutes est aussi enregistré. L'accumulation progressive de glace alourdit les instruments de mesure, entraînant une diminution de l'écart-type de la vitesse ou de la direction du vent à l'intérieur de ces dix minutes. S'il y a suffisamment de glace, les instruments peuvent s'arrêter, rendant l'écart-type nul. Ross (2002) explique que le premier signe de givrage est la diminution de l'écart type d'une ou des girouettes, suivi d'une réduction de l'écart-type des anémomètres et d'une diminution soudaine de la vitesse lue d'un des anémomètres. Lors de givrage atmosphérique sévère, tous les instruments sont figés.

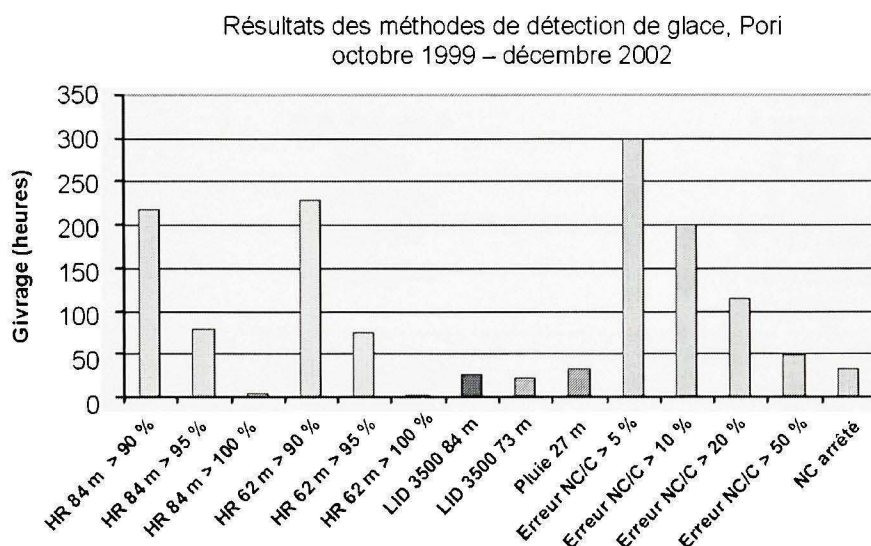
Une étude sur la mesure de vitesse du vent en conditions givrantes effectuée par NRG Systems discute aussi brièvement des manières de détecter la persistance du givrage avec les écarts-types (Kenyon et Blittersdorf, 1996). Cette étude mentionne que les observations suivantes indiquent la présence de glace sur les instruments (anémomètres et girouettes) :

- des augmentations brèves et soudaines de l'écart-type des anémomètres et des girouettes ;
- une valeur d'écart-type sous la normale pour les anémomètres et les girouettes, et ;
- une valeur d'écart-type de la direction nulle.

### 2.1.2.3 Comparaisons des méthodes indirectes

Comme pour les résultats obtenus en comparant les différents instruments de mesure et de détection du givrage atmosphérique, les résultats des méthodes discutées ici ne sont pas concordants. Le prochain graphique (figure 2.8) illustre les résultats pour Pori en Finlande entre octobre 1999 et décembre 2002. En plus de présenter les résultats de différentes méthodes indirectes de détection du givrage atmosphérique et de l'instrument Labko 3500, ce graphique présente les résultats pour plus d'une élévation et/ou pour plus d'une valeur de pourcentage d'erreur entre anémomètres ou pour plus d'un seuil d'humidité relative. Pour la méthode de l'anémomètre chauffé et de l'anémomètre non chauffé, le pourcentage d'erreur choisi influe énormément sur les heures de givrage obtenues. Il en va de même pour la limite d'humidité relative choisie avec la méthode de température et d'humidité relative. Il est important, en observant ce graphe, de faire la distinction entre les méthodes qui mesurent la durée et la

persistance des phénomènes de givrage atmosphérique. La méthode des deux anémomètres mesure la période de temps pendant laquelle il y a de la glace sur un ou des anémomètres ; cela correspond à la période d'accrétion et à période la persistance. Les autres méthodes illustrées dans le graphe mesurent seulement la durée des phénomènes de givrage atmosphérique, et ne tiennent pas compte de la persistance. Il n'est donc pas possible de comparer directement la méthode des deux anémomètres avec les autres méthodes présentées dans le graphe.



**Figure 2.8 Comparaison entre méthodes de détection de givrage atmosphérique**  
(HR : humidité relative élevée, LID : Instrument Labko Ice Detector, Pluie : mesure de précipitations, Erreur NC/C : erreur entre l'anémomètre chauffé et non chauffé).  
(Tiré de Laakso *et al.*, 2003a [traduction libre])

Source : Cette figure est tirée de Laakso *et al.*, 2003a « Comparison of ice sensors for wind turbines » et correspond à la « Figure 9. Icing indications of different ice detection devices at Pori during October 1999 and December 2002 » présentée en page 10 du document original.

### 2.1.3 Bilan sur la mesure et la détection

Pour résumé, il existe une variété de moyens pour mesurer ou estimer la durée, la persistance, le type et l'intensité du givrage atmosphérique. Ceci peut se faire en utilisant des instruments conçus à ces fins, ou en utilisant une méthode indirecte de mesure et de détection du givrage atmosphérique. Le tableau 2.1 récapitule la fonction de chaque instrument et méthode mentionnée (en incluant les modèles du chapitre 1).



Tableau 2.1

Les instruments et méthodes indirectes de mesure et de détection du givrage atmosphérique et les caractéristiques du givrage atmosphérique qu'ils permettent de mesurer ou d'estimer (T : température de l'air, HR : humidité relative, RS : radiation solaire, HN : hauteur des nuages, VIS : visibilité, TEL : teneur en eau liquide, TES : teneur en eau surfondue, PRÉ : précipitations)

Caractéristique	Instruments (Nom/Fabricant)	Méthodes indirectes
<i>Durée des conditions de givrage atmosphérique</i>	B.F. Goodrich Labko Givromètre METEO HoloOptics	T, HR T, HR, RS T, HN T, VIS T, VIS, HN T, TEL ou TES T, PRÉ
<i>Persistance de l'accrétion</i>	Cylindres (passif) Glacimètre IceMonitor	Anémomètre chauffé vs non chauffé Écart-type des girouettes et anémomètres
<i>Type d'accrétion</i>	Cylindres (passif) Glacimètre	T, PRÉ
<i>Intensité d'accrétion</i>	Labko B.F. Goodrich Cylindres (passif) Glacimètre Givromètre	T, PRÉ

## 2.2 Instrumentation du banc d'essai

Afin de retirer un maximum d'information d'une installation destinée à évaluer la performance d'instruments et de méthodes de détection du givrage atmosphérique, les instruments choisis devraient permettre de mesurer ou d'estimer les quatre caractéristiques listées dans le tableau 2.1, soit la durée, la persistance, le type et l'intensité d'accrétion et, si possible, de plus d'une manière afin d'effectuer des comparaisons. Puisque le but du banc d'essai est de prendre des mesures lors des événements de givrage atmosphériques, tous les instruments et équipements choisis devraient être en mesure de fonctionner adéquatement malgré ces intempéries. Ce qui suit énumère les instruments choisis et justifie le choix d'instruments.

### 2.2.1 Instruments de mesure et de détection directs

À la lumière des informations rassemblées, il a été décidé que l'instrument 0872E3 de la compagnie B.F. Goodrich serait le meilleur choix en tant qu'instrument de mesure et de détection direct du givrage atmosphérique, et ce, pour les raisons listées ci-dessous. Tout d'abord, un instrument de la compagnie B.F. Goodrich est recommandé, car :

- la littérature sur ces détecteurs de givrage atmosphérique est plus importante que pour les autres instruments ;
- les forces et les faiblesses de ces détecteurs de givrage atmosphérique semblent être mieux connues, comprises et documentées que celles des autres instruments, et ;
- l'expérience avec ces instruments est vaste, tant au Canada qu'ailleurs.

Et le modèle 0872E3 en particulier est recommandé parce que :

- la sonde et le support de la sonde sont tous les deux chauffés lors du processus de dégivrage ;
- la période de dégivrage peut être ajustée par l'utilisateur jusqu'à un maximum de 60 secondes, et ;
- il est utilisé dans les systèmes AWOS du SMC et dans les systèmes ASOS aux États-Unis, donc les mesures pourront être plus facilement comparées à la banque de données de ces services météorologiques.

Cet instrument permet de détecter la durée des phénomènes de givrage atmosphérique et l'intensité d'accrétion. Il ne permet pas d'évaluer la persistance des événements ni le type de glace formé. Un instrument de mesure passif peut donc venir compléter les mesures de cet instrument automatisé. Le choix s'est arrêté sur le glacimètre d'Hydro-Québec, qui a été manufacturé par l'École de technologie supérieure pour le banc d'essai. Il sera question d'enregistrer les mêmes informations qu'enregistre Hydro-Québec, dans l'éventualité où il serait possible de consulter leur base de données et de comparer les mesures. Les mesures faites sur l'instrument permettent de déterminer la durée des événements, la persistance, le type de givrage et l'épaisseur des accrétions. L'instrument est installé à 1.2 m du sol à proximité de la tour de mesure, et des mesures seront effectuées deux fois par jour par un employé de Cartier énergie éolienne.

## 2.2.2 Instruments pour méthodes de mesure et de détection indirectes

Pour ce qui en est de la mesure et de la détection indirecte, des méthodes citées dans ce chapitre et au chapitre 1, seules les méthodes faisant appel aux paramètres de visibilité et nébulosité ne seront pas étudiées. Ce qui suit énumère les méthodes à évaluer et les instruments nécessaires à chaque méthode.

### 2.2.2.1 Différence entre anémomètres chauffés et non chauffés

En guise d'anémomètre non chauffé, il a été décidé de prendre un instrument dont l'utilisation est très répandue en Amérique du Nord dans le domaine de l'énergie éolienne, soit l'anémomètre NRG Maximum #40. De plus, un « RM Young Wind Monitor » 05103-10-L sera aussi installé. Ce dernier mesure la vitesse et la direction du vent. Ross (2002) explique que la vitesse et l'écart-type lus par l'anémomètre RM Young sont moins affectés par la présence de glace que les instruments de NRG Systems. Ils sont moins susceptibles d'être bloqués par la glace, mais la mesure de vitesse est tout de même influencée (Schaffner, 2002). Il sera intéressant de comparer les réactions de ces deux instruments aux mêmes événements de givrage atmosphérique.

Pour les anémomètres chauffés, il sera encore une fois question de choisir un instrument dont l'utilisation est répandue en Amérique du Nord. Le NRG « IceFree 3 » qui est un anémomètre à coupole avec une puissance de chauffage de 192 W. En plus de cet anémomètre, un anémomètre ultrasonique chauffant sera installé. D'après une étude sur six anémomètres soniques chauffants décrite dans le rapport « NEW ICETOOLS » (Tammelin *et al.*, 2005), l'anémomètre le plus recommandé en conditions de givrage atmosphérique sévères est le Metek USA-1 avec un chauffage de 125 W. Il est suivi du Metek USA-1 avec un chauffage de seulement 50 W, et de l'anémomètre ultrasonique de la compagnie Thies avec un chauffage de 72 W. Les anémomètres cités de la marque Metek sont tridimensionnels et leurs prix sont beaucoup plus élevés que celui de la marque Thies. Ainsi pour des raisons économiques, l'anémomètre ultrasonique chauffant bidimensionnel de la compagnie Thies a été choisi pour le banc d'essai. Il est à noter que l'étude citée (Tammelin *et al.*, 2005) ne teste pas tous les anémomètres soniques disponibles sur le marché et qu'il est possible que d'autres marques ou modèles soient aussi très performants en climats givrants.



### **2.2.2.2 Variation des écarts-types**

Pour mesurer la direction du vent, une girouette non chauffante de NRG, la #200P, a été choisie, car comme pour les autres instruments de cette compagnie, elle est très utilisée en Amérique du Nord. La girouette chauffante NRG « IceFree 3 », avec une puissance de chauffage de 192 W, a aussi été choisie. En plus de ces deux girouettes, la direction du vent est aussi indiquée par le « RM Young Wind Monitor » et par l'anémomètre Thies.

### **2.2.2.3 Température et humidité relative**

Les instruments qui mesurent la température et l'humidité relative sont des instruments que possédait déjà le partenaire industriel, Hélimax énergie inc. Le capteur de température 107 de Campbell Scientific et le capteur d'humidité relative NRG RH-5 ont été installés sur le banc d'essai.

### **2.2.2.4 Température, humidité relative et radiation solaire**

Afin de pouvoir vérifier la méthode qui utilise aussi la radiation solaire, il a été nécessaire de se procurer un pyranomètre, instrument qui mesure la radiation solaire. Le pyranomètre choisi est le même pyranomètre que celui utilisé au banc d'essai sur le givrage atmosphérique de Murdochville, soit le LI200S de Campbell Scientific (Fortin *et al.*, 2006).

### **2.2.2.5 Température et précipitations**

Le pluviomètre de NRG a été choisi pour tester cette méthode.

## **2.2.3 Autres instruments et accessoires**

Les autres composantes nécessaires au bon fonctionnement d'un banc d'essai sont un système d'acquisition, des câbles qui relient l'instrument au système d'acquisition, un système de transmission des données, des transformateurs pour les instruments chauffés, des supports pour les instruments, etc. Le système d'acquisition choisi est le CR1000 -55, qui peut fonctionner jusqu'à des températures de -55 °C. Étant donné l'importante quantité d'instruments, il a été nécessaire de commander des modules supplémentaires et d'ajouter des ports au système d'acquisition.

Il est aussi important de mesurer la pression atmosphérique, paramètre qui permet de calculer, par exemple, la densité de l'air. Le baromètre utilisé est aussi un instrument que possédait déjà Hélimax Énergie inc : le NRG #BP20.

Finalement, deux derniers appareils sont ajoutés au banc d'essai. Ce sont un appareil photo numérique et une lumière, afin de vérifier visuellement s'il y a accréation de glace ou non. L'appareil photo est installé pour photographier, une fois par heure, une partie des instruments du banc d'essai. Afin de ne pas perdre d'information pendant la nuit, une lumière éclaire ces instruments.

L'appareil photo numérique choisi est la CC640 de Campbell Scientific qui résiste à des températures de  $-40^{\circ}\text{C}$  et qui peut être directement relié à un système d'acquisition de données météo (Campbell Scientific, 2005). Cet appareil photo est utilisé dans d'autres applications en climat froid, comme en Alaska par la « Federal Aviation Agency (Federal Aviation Administration, 2008) » et au Nunavut à la « McGill Arctic Research Station » (Campbell Scientific, 2003). La lentille commandée pour l'appareil photo est celle de 3.5-8 mm. Même si l'appareil résiste bien au froid, il est nécessaire de le mettre dans un boîtier pour le protéger des intempéries (glace, neige ou pluie). Le boîtier chauffant CC5723-2 de la compagnie Pelco a été choisi. Ce dernier a 50 W de chauffage, 10 W de ventilation, un dégivreur de 30 W et un essuie-glace.

## **2.3 Disposition des instruments**

Les instruments sont montés sur une tour de mesure déjà en place au parc éolien de Baie-des-Sables. Puisqu'il y a plusieurs instruments, ceux-ci sont distribués sur plusieurs supports afin de minimiser les interférences entre les instruments.

Dans la présente section, les recommandations émises par la norme 61400-12-1 de la Commission électrotechnique internationale (IEC) (Commission Electrotechnique Internationale, 1998) par rapport à l'installation d'instruments sur des tours sont brièvement expliquées. L'emplacement des instruments pour le banc d'essai de Baie-des-Sables est ensuite décrit.

### **2.3.1 Norme 61400-12-1**

La norme 61400-12-1 (Commission Electrotechnique Internationale, 1998) est la norme qui explique comment effectuer les mesures de performance des éoliennes et son annexe G décrit

comment monter des instruments de mesure sur une tour de mesure météorologique afin de minimiser l'influence des supports et des bras sur le vent au niveau de ces instruments.

La norme explique que les anémomètres et girouettes doivent être montés à une distance verticale du support entre 15 à 25 fois plus importante que le diamètre de ce support. Dans le cas du banc d'essai de Baie-des-Sables, le diamètre du support est de près de 70 mm, ainsi les instruments doivent se situer à au moins 1050 mm du celui-ci. De plus, deux instruments placés sur la même ligne horizontale doivent être séparés d'au moins 1.5 m, et deux instruments alignés verticalement doivent être installés à une distance verticale de 1.5 à 2.5 m. Finalement, les tubes verticaux qui supportent les instruments ne doivent pas avoir un diamètre supérieur à celui du corps de l'instrument.

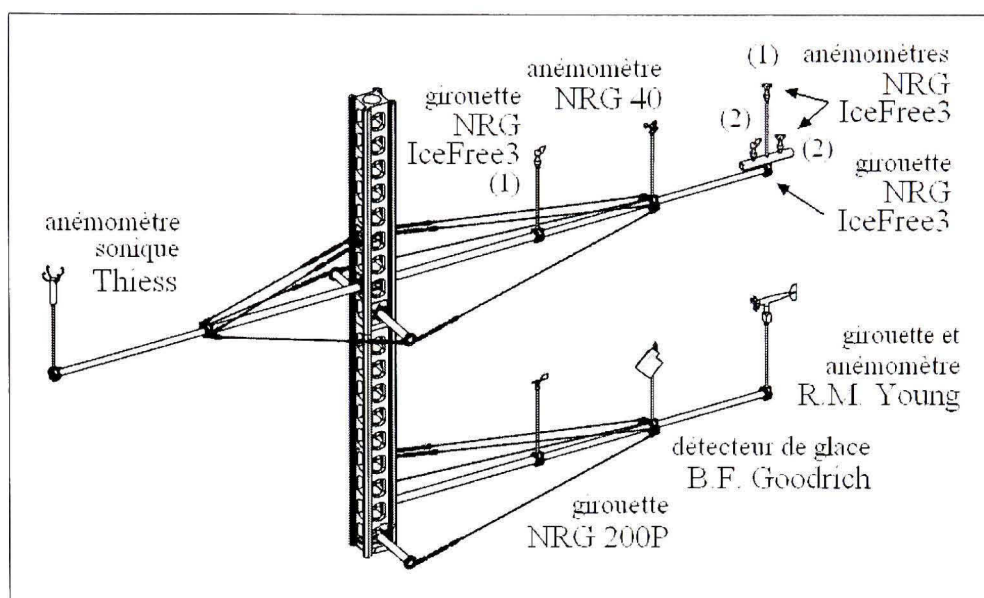
L'annexe décrit ensuite de quelle manière évaluer la perturbation causée par la tour sur les anémomètres. La tour de mesure à Baie-des-Sables est une tour de forme carrée en treillis. En fonction de la solidité de la tour et de la distance des instruments par rapport à la tour, il est possible de déterminer le déficit de vitesse à l'instrument grâce à l'équation G.1 de la norme. En fonction de la direction de provenance du vent, le vent mesuré par les instruments sera perturbé par la tour ou par les autres instruments. Il sera important, lors de l'analyse des données, d'éliminer certains secteurs pour exclure des données inexacts.

### **2.3.2 Emplacement des instruments**

Trois bras principaux, dessinés à la figure 2.9, soutiennent une bonne partie des instruments. Deux des bras se trouveront à 25.1 m du sol, et le troisième se trouvera à 21.5 m du sol. Il y a par conséquent une distance verticale de 3.6 m entre les deux rangées d'instruments et une distance verticale de 2.6 m entre les instruments du bas et le bras du haut, ce qui respecte les recommandations de la norme. Les deux bras qui soutiennent plusieurs instruments ont une longueur de cinq mètres, et le troisième bras a une longueur de quatre mètres. Horizontalement, les instruments sont séparés par 1.5 m, ce qui respecte aussi la norme discutée ci-dessus. Les instruments les plus près de la tour se situent à environ 2 m de la tour, et les instruments les plus loin, à environ 5 m.

Dans cette figure, il est possible de voir qu'il y a deux anémomètres et deux girouettes NRG IceFree3, et que deux des instruments ne respectent pas les recommandations de la norme 61400-12-1 (la girouette et l'anémomètre NRG « IceFree 3 » (2)) car ils sont posés directement sur un support. Cela fait suite à un souhait émis par le partenaire industriel, Hélimax



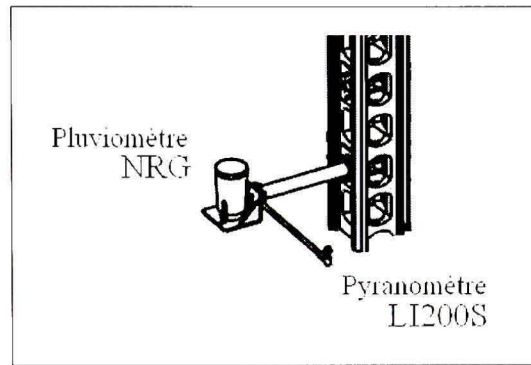


**Figure 2.9** *Shéma de la section principale du banc d'essai.* (Croquis d'Alexandre Vigneault de l'École de technologie supérieure, 2008)

énergie inc., d'étudier l'interférence causée par une installation des instruments très près de leur support (installation utilisée par un de leurs clients sur des nacelles d'éoliennes). Cette interférence pourra être étudiée dans le cas où il y a accréation de glace comme dans le cas où il n'y en a pas. Il est aussi possible de voir que le deuxième anémomètre NRG « IceFree 3 » est situé plus haut afin d'être à l'extérieur de la zone d'interférence du vent créée par les deux instruments et le support à leur base.

L'appareil photo numérique et la lumière ne figurent pas dans l'image, mais ils sont placés de manière à photographier et éclairer la plus grande partie des instruments, soit les deux bras de la droite à la figure 2.9. L'orientation de l'appareil photo permettra de voir comment se comportent une partie des instruments lors de givrage, y inclu le détecteur de givrage atmosphérique automatisé. Cela permettra de voir, entre autres, quelle est la performance du chauffage appliqué aux instruments chauffants.

Deux autres instruments, qui ne figurent pas dans la figure 2.9, sont installés à environ 5.5 m du sol. Le pluviomètre et le pyranomètre sont installés tel qu'illustré à la figure 2.10. Il n'y a pas de règles particulières par rapport à l'installation du pluviomètre, sauf qu'il devrait être placé assez haut pour ne pas être enseveli de neige l'hiver, et qu'il ne devrait pas être dans un endroit où il y a beaucoup de vent (Poley, 2007).



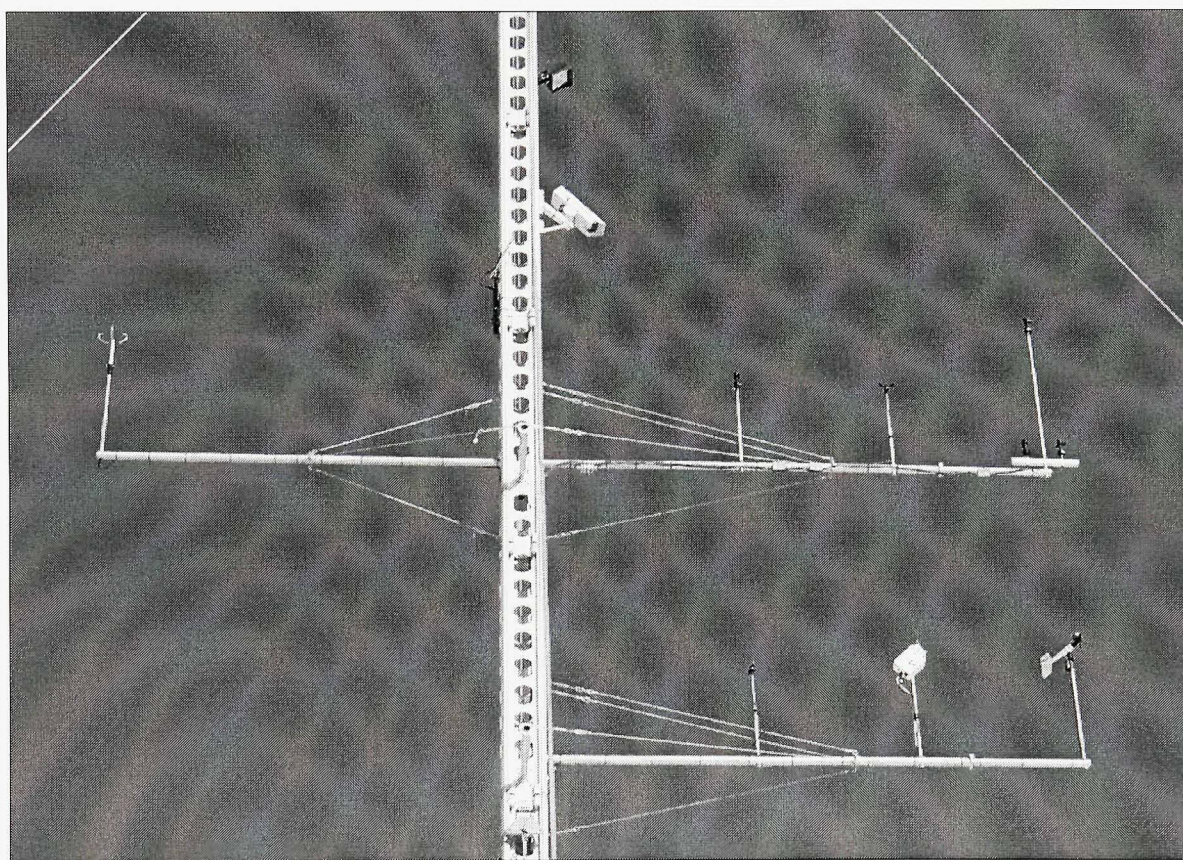
**Figure 2.10** *Shéma d'une section du banc d'essai.* (Croquis d'Alexandre de l'École de technologie supérieure, 2008)

Finalement, le capteur de température, le baromètre et le capteur d'humidité relative, sont installés à 4.5, 2.5 et 2.0 m du sol respectivement.

Le tableau qui suit (tableau 2.2) liste les instruments du banc d'essai, fournit une image des instruments, indique leurs unités de mesure, leurs puissances de chauffage ainsi que leurs emplacements et l'orientation du bras où chacun est installé.

Le banc d'essai est installé et opérationnel depuis la fin de l'hiver 2008. La photo à la figure 2.11 montre la section principal de ce banc d'essai.



















**Figure 2.11** *Image de la section principale du banc d'essai.* (Photo de Shant Dokouzian de Hélimax énergie inc., 2008)



Tableau 2.2

Informations sommaires sur les instruments du banc d'essai

Instrument	Image	Unités	Chauffage (W)	Hauteur (m)	Distance de la tour (m)	Orientation du bras (°)
Anémomètre #40		m/s	-	26.2	3.45	313
Girouette #200P		°	-	22.7	1.95	313
Anémomètre IceFree3		m/s	192	(1) 27.1 (2) 25.4	(1) 4.95 (2) 5.13	313
Girouette IceFree3		(°)	192	(1) 26.3 (2) 25.4	(1) 1.95 (2) 4.78	313
Anémomètre Thies		m/s et (°)	72	26.7	3.87	133
Ané. et gir. 05103-10-L		m/s et (°)	-	22.9	4.95	313
Pluviomètre NRG		mm	-	5.5	1.00	223
Pyranomètre LI200S		W/m <sup>2</sup>	-	5.5	1.40	180
Caméra CC640		-	-	29.0	-	-
Boîtier Pelco		-	90	29.0	-	-
Détecteur de glace 0872E3		mm	350	22.8	3.45	313
Température 107		°C	-	4.5	-	-
Humidité rel. RH-5		%	-	2.0	-	-
Baromètre #BP20		Pa	-	2.5	-	-

## CHAPITRE 3

### MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION DES MODÈLES DE PRÉDICTION DES ÉVÉNEMENTS DE GIVRAGE ATMOSPHÉRIQUE

La revue de littérature a permis de voir qu'il existe plusieurs modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique. La plupart des recherches effectuées sur ces modèles évaluent les résultats de différentes manières et avec différents types de données. De plus, les évaluations et validations sont parfois décrites en termes qualitatifs, et non de manière quantitative. Il n'est donc pas évident de se faire une idée du modèle à privilégier. C'est pourquoi l'objectif du présent chapitre est de mettre en place une méthodologie permettant l'évaluation quantitative de ces modèles et permettant aussi une comparaison entre les modèles. Ce qui suit commence par décrire plus en détail les deux bases de données choisies pour l'analyse et la validation des modèles, pour ensuite aborder le traitement préliminaire de ces données et finalement décrire la méthodologie d'évaluation.

Une partie des informations décrites dans ce chapitre est brièvement résumée dans deux articles de comptes-rendus de conférence : le premier est publié dans les comptes-rendus du « 12<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures » (Comeau *et al.*, 2007), et l'autre devra paraître dans les comptes-rendus de la « 18<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference » (Comeau *et al.*, 2008).

#### 3.1 Description des données

Les données utilisées pour l'application de différents modèles d'identification des périodes de givrage atmosphérique sont les données de la RRAN et les données de validation sont des données d'aéroport (METAR). Voici une description plus détaillée de ces deux types de données.

##### 3.1.1 RRAN

Les données de réanalyse sont générées à partir d'une version du modèle de PNT Eta, au NCEP (Mesinger *et al.*, 2006). Cette base de données est couverte présentement une période de 28 ans, mais elle est continuellement mise à jour et la période de temps disponible devient de plus en plus longue (Mesinger *et al.*, 2006). Les données ont une résolution temporelle de trois heures et une résolution spatiale de 32 km à l'horizontale et de 45 niveaux

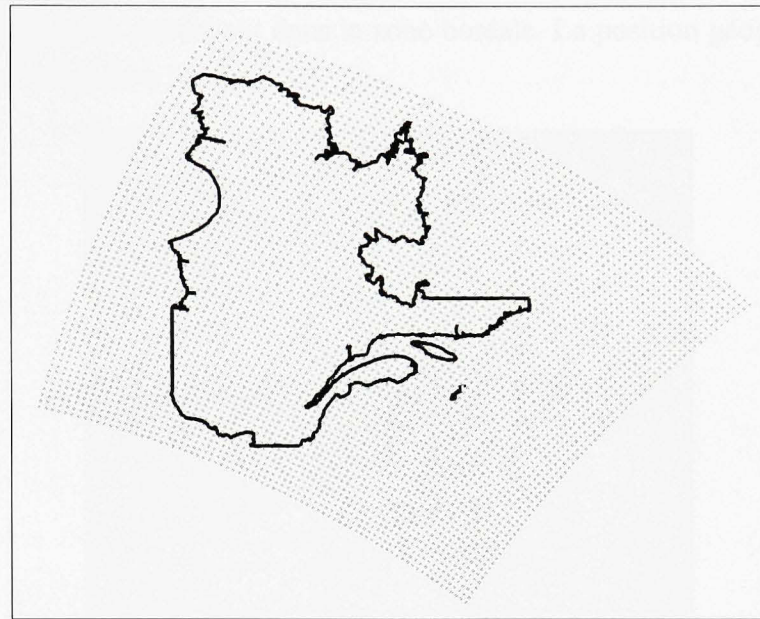
isobariques à la verticale. Une grande variété de variables météorologiques est décrite par cette base de données, dont la température, l'humidité relative, la hauteur de la base des nuages, l'eau dans les nuages et une prévision des pluies verglaçantes. La liste complète du contenu des données de la RRAN est disponible à l'annexe II. La base de données de la RRAN est gratuite et les données peuvent être téléchargées à n'importe quel moment du site : <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/rrean/>.

Parmi les variables météorologiques qui sont utilisées dans la présente recherche (celles mentionnées dans le paragraphe précédent), toutes sont des variables continues sauf la prévision de pluies verglaçantes. Cette dernière variable est dichotomique ; lorsque le modèle prévoit de la pluie verglaçante, sa valeur est de un et lorsqu'il n'en prévoit pas, sa valeur est de zéro. La prévision de pluie verglaçante est calculée dans le post-traitement du modèle, après que les autres variables de réanalyse aient été calculées. Un algorithme est appliqué au profil vertical de température afin d'émettre un diagnostic sur le type de précipitation qui pourrait tomber : neige, pluie, grêle ou pluie verglaçante. L'algorithme utilisé est celui développé par Baldwin et Contorno en 1993 (Manikin, 2005). Cet algorithme décide si les conditions atmosphériques sont propices à la formation de cristaux de glace et si oui, prévoit la forme qu'ils prendront une fois rendus à la surface. Pour ce faire, l'algorithme identifie les couches de l'atmosphère qui sont au-dessus du point de congélation et celles qui sont en dessous ou au point de congélation.

Les données ont été téléchargées pour les années 1979 à 2006, pour un total de 28 années de données et de 5016 points de maille. Un nombre important de points ne se situent toutefois pas sur le continent ou à l'intérieur des frontières québécoises, comme le montre la figure 3.1.

La qualité des données de la RRAN est abordée par Mesinger *et al.* (2006). Les auteurs montrent que la température de l'air et de la vitesse du vent se comparent bien à des observations en provenance d'une centaine de radiosondes et à des observations de stations de surface sur le territoire de la RRAN. Quand aux prévision de précipitations, Manikin (2005) montre que l'algorithme utilisé pour les prévisions de pluie et de neige génère des résultats qui se comparent bien aux observations, et que les prévisions de pluie verglaçante et de grêle sont un peu moins bonnes. Pour les autres variables de la RRAN utilisées dans le cadre de ce mémoire, il n'a pas été possible de trouver des documents décrivant leur qualité. Finalement, durant ce travail de recherche, les coefficients de corrélation ( $R$ ) entre la températures et le point de rosée de la RRAN et la températures et le point de rosée des aéroports a été calculé.





**Figure 3.1** *Points de données de la RRAN téléchargés.*

Certains résultats sont montrés dans Comeau *et al.* (2007). Les coefficients de corrélations varient de 0.94 et 0.98 pour les six aéroports étudiés.

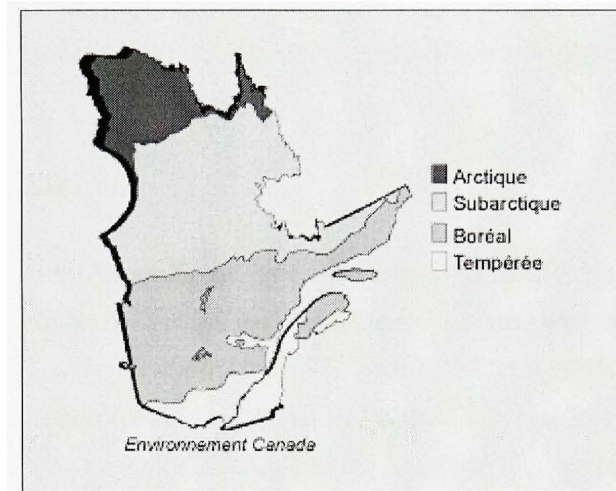
### 3.1.2 METAR

Les données météorologiques d'aéroports donnent une variété de variables météorologiques, dont la plus importante pour des données de validation : les périodes de givrage atmosphérique. Ce qui suit présente les aéroports choisis pour l'analyse et décrit quelques aspects des données METAR.

#### 3.1.2.1 Aéroports choisis

Les aéroports choisis pour le processus de validation sont les aéroports de Mirabel (Montréal), Jean -Lesage (Québec), Mont-Joli, Gaspé, Bagotville et Chibougamau-Chapais. La validation est donc basée sur six stations différentes, et pour une période d'analyse de six ans (de 2000 à 2005). Comme le territoire québécois est très vaste, on y retrouve différentes régions éco-climatiques. L'image 3.2 illustre la répartition des régions arctiques, subarctiques, boréales et tempérées sur l'ensemble de la province. Les aéroports de Mirabel, Québec, Mont-Joli et Bagotville se retrouvent à l'intérieur de la région tempérée, et les aéroports de Gaspé et de

Chibougamau-Chapais se retrouvent dans la zone boréale. La position géographique des aéroports choisis est illustrée à la figure 3.3.



**Figure 3.2 Répartition des régions écoclimatiques au Québec (Ressources naturelles Canada, 2007).**

Source : Cette figure est tirée de Ressources naturelles Canada, 2007 « Impacts et adaptation liés aux changements climatiques » et correspond à la « Figure a) Répartition des Régions Écoclimatiques du Québec » dans le document original.



**Figure 3.3 Emplacement des aéroports choisis pour l'étude.**

Le premier appel d'offres pour l'énergie éolienne lancé au Québec en 2003 était limité à la Gaspésie uniquement (Ressources naturelles et faune Québec, 2007). Le second appel d'offres, qui a pris fin en 2007, n'a pas imposé de restriction géographique. Cependant, les 66

projets soumis à cet appel d'offres se trouvent dans les régions écoclimatiques tempérées et boréales (Ressources naturelles et faune Québec, 2007). Ainsi, les six stations choisies ont été jugées suffisantes pour la validation d'une méthode sur ces zones d'intérêt. Il est cependant clair que les résultats ne seront pas forcément applicables aux régions écoclimatiques arctique et subarctique.

### 3.1.2.2 Format METAR

Les données d'aéroport ont été acquises dans le format METAR, qu'il est possible de voir dans la figure 1.9 du chapitre 1. Toutes les données du tableau sont résumées dans les deux lignes de texte qui débutent par la contraction METAR, dans la première case de la figure. Ici, il ne sera question que de décrire les codes qui indiquent le givrage atmosphérique. Pour des informations complètes sur le format METAR et sur le décodage, voir le « Federal Meteorological Handbook No.1, Surface Weather Observations and Reports », du « Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research » aux États-Unis (Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, 2005).

Les données METAR encodent les différents types de phénomènes givrants en utilisant des séries de lettres. Le tableau qui suit (tableau 3.1) présente une partie des codes utilisés pour le givrage atmosphérique.

En plus de ces codes, les occurrences de gelée (ou gelée blanche) sont aussi indiquées. Celles-ci sont notées dans la section remarque « RMK » des METARS par le code « FROIN », qui signifie « **FR**ost **On** **IN**dicator » (« frost » est le terme anglais pour gelée) (Transport Canada, 2007). Tel que mentionné au chapitre 1, la gelée désigne les accrétions de glace qui se forment lorsque la vapeur d'eau dans l'air se transforme en solide sur un substrat, sans passer par l'état liquide. Puisque ce type de givrage atmosphérique a une influence plutôt négligeable sur la production d'énergie éolienne, les signaux « FROIN » ne sont pas retenus comme événements de givrage atmosphérique dans le cadre de la présente recherche.

Pour l'aéroport de Chibougamau-Chapais, il existe aussi le code « ICG » dans la section remarque « RMK ». Ces lettres signifient « **IC**in**G** » (givrage atmosphérique), et ce code est utilisé lorsqu'il y se produit du givrage atmosphérique sans qu'il n'y ait de précipitation (Transport Canada, 2007). Puisque les phénomènes de givrage atmosphérique sans précipitations à Chibougamau sont aussi dénotés par FZFG ou FZBR, il n'est pas clair si ICG est complémentaire à ceci, ou s'il désigne plutôt des gelées comme les FROIN. Cependant, la majorité des



Tableau 3.1

Codification des différents phénomènes de givrage atmosphérique. (Tiré de Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, 2005 [traduction libre])

Intensité ou proximité	Descripteur	Précipitation	Obscurcissement
- : Léger ( ) : Modéré + : Sévère VC : à proximité	FZ : givrant/ verglaçant	DZ : bruine RA : pluie	BR : brume FG : brouillard
Exemples : <b>-FZFG</b> brouillard givrant léger, <b>FZRA</b> pluie verglaçante modérée			

Source : Ce tableau est tiré de Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research, 2005 « Federal Meteorological Handbook No. 1, Surface Weather Observations and Reports » et correspond à une partie du « Table 8-5. Notations for Reporting Present Weather » présenté en page 8-6 dans le document original.

ICG sont associés à un ciel clair (pas de nuages sous 10 000 pieds) alors que les brouillards givrants et les événements de givrage en nuage ont évidemment lieu lorsqu'il n'y a pas une grande visibilité ou lorsque la hauteur de la base des nuages est basse. Dans le cadre de cet exercice, les ICG sont donc considérés comme des événements de gelée comme les FROIN.

Finalement, il importe de mentionner qu'il n'y a pas de signal pour le quatrième type de givrage atmosphérique, soit la neige fondante.

Pour récapituler, les signaux retenus pour la recherche sont les événements de précipitations verglaçantes (FZRA et FZDZ) et les événements de brouillards ou brumes givrants (FZFG ou FZBR). Le prochain tableau (tableau 3.2) indique, par année et par station, le nombre d'événements de précipitations verglaçantes et le nombre d'événements de brouillards givrants.

### 3.1.2.3 Détection du givrage atmosphérique

Les observations de givrage atmosphérique aux aéroports proviennent soit d'un système AWOS, soit d'observations humaines, ou soit des deux. Le système AWOS est muni de multiples capteurs, d'interfaces périphériques et d'un contrôleur qui combinent les données dans un seul message météorologique (Environnement Canada, 2008a). Le givrage est mesuré par l'un des modèles de détecteurs de glace B.F. Goodrich décrits au chapitre 2, le modèle 0872E3. Envi-

Tableau 3.2

Nombre d'événements de givrage atmosphérique par station, par année et par type

Stations :	Gaspé	Mt-Joli	Québec	Chiboug.	Mirabel	Bagot.
Année	Type de givrage atmosphérique : Précipitations / Brouillards					
<b>2000</b>	7 / 4	11 / 2	17 / 5	29 / 1	22 / 4	23 / 12
<b>2001</b>	16 / 5	11 / 0	19 / 7	22 / 4	40 / 2	17 / 3
<b>2002</b>	27 / 13	11 / 9	39 / 7	43 / 4	42 / 9	30 / 15
<b>2003</b>	0 / 8	23 / 4	18 / 1	38 / 3	35 / 4	22 / 6
<b>2004</b>	10 / 4	7 / 3	24 / 7	17 / 6	26 / 2	19 / 6
<b>2005</b>	15 / 3	11 / 14	26 / 10	26 / 3	31 / 3	9 / 3
<b>Total</b>	75 / 37	74 / 36	143 / 37	175 / 21	196 / 24	120 / 45
<b>Total (%)</b>	67 / 33	67 / 33	79 / 21	89 / 11	89 / 11	73 / 27

ronnement Canada explique que cet instrument « ... détecte le givrage dû à la gelée, au givre blanc de brouillard glacé, au verglas et parfois à la neige fondante par température proche du point de congélation (Environnement Canada, 2008a) ». Afin de savoir quel type de givrage atmosphérique a été observé, le signal du 0872E3 est traité par un algorithme multiparamétrique du système détecteur d'occurrences de précipitations. Lorsqu'il y a givrage atmosphérique à l'heure de l'observation, un signal de givrage est émis. Lorsqu'il y a eu du givrage dans l'heure précédent l'observation, mais pas dans les 15 dernières minutes, un signal de givrage récent (RE) est émis (REFZRA par exemple). Puisqu'il n'y a pas de code pour la neige fondante et que ce type de givrage atmosphérique ne peut pas toujours être détecté avec le système AWOS, ce type de givrage atmosphérique n'est pas pris en compte dans la présente recherche.

#### 3.1.2.4 Incertitude sur les données

Comme pour toute mesure, il existe une incertitude par rapport aux mesures de givrage atmosphérique. Dans un premier temps, la résolution des données est de une heure. Chaque heure, les METAR indiquent s'il y a ou non du givrage atmosphérique à ce moment-là où dans l'heure qui a précédé (avec l'ajout du préfixe RE). Il n'est donc pas possible de savoir si les conditions de givrage atmosphérique durent quelques minutes ou une heure.

Ensuite, il peut y avoir des périodes de givrage non détectées, soit par les observateurs, soit par les instruments. Comme il l'a été mentionné au chapitre 2, lorsque les températures sont près de zéro et la teneur en eau liquide élevée, il se peut que l'instrument de détection ne fonctionne pas adéquatement.

En outre, les signaux FROIN et ICG sont parfois accompagnés de signaux de neige, de pluie, de brouillard ou de brume. Dans de tels cas, on pourrait croire que ces événements seraient désignés comme événements de pluie, bruine, brouillard ou brume givrants. Toutefois, tel n'est pas le cas et cela ajoute une incertitude.

Étant donné les informations disponibles, il aurait été très difficile d'évaluer de manière quantitative l'incertitude sur les périodes de givrage atmosphérique, donc cette incertitude n'est pas prise en compte dans les calculs qui sont effectués avec ces données. Il est toutefois considéré important de mentionner les sources d'incertitude.

### **3.1.2.5 Résumé pour les données METAR**

Les données METAR indiquent les périodes de précipitations verglaçantes (pluie ou bruine), et de brouillards ou de brume givrants. Ils indiquent aussi les périodes de gelée, mais ce type de givrage n'est pas pris en compte dans les analyses qui suivent, car il est considéré comme ayant peu d'impact sur le fonctionnement des éoliennes. Les événements de neige mouillée ne sont pas indiqués, donc ce type de givrage n'est pas non plus considéré. Des données de six aéroports et de six années sont analysées. Les aéroports choisis se trouvent tous dans la région sud du Québec, dans les régions éoclimatiques boréales ou tempérées. L'ensemble de stations ne représente donc pas la variété de climats existants au Québec, mais le développement éolien actuel se fait dans les zones boréales et tempérées (Ressources naturelles et faune Québec, 2007). Finalement, il existe quelques sources d'incertitude sur les données METAR qui ne peuvent être évaluées de manière quantitative.

## **3.2 Traitement préliminaire des données**

Le traitement préliminaire des données a surtout comme objectif de ramener les deux bases de données, les données de la RRAN et les données METAR, à la même échelle temporelle et spatiale pour fins de comparaisons. Le calcul de la teneur en eau liquide est aussi décrit, et finalement, le pourcentage de données manquantes par base de données est indiqué.



### 3.2.1 Traitements temporels

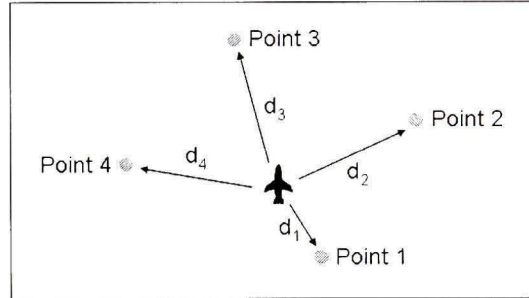
Les données de la RRAN ont une résolution temporelle de trois heures, avec des analyses générées pour 0h, 3h, 6h, 9h, 12h, 15h, 18h et 21h (heure universelle), alors que les données d'aéroport ont une résolution de une heure. Les deux bases de données sont des mesures ou des analyses ponctuelles, et non des moyennes sur l'heure (METAR) ou sur les trois heures (RRAN). Pour les besoins de la comparaison, les données horaires d'aéroports coïncidant aux heures de la RRAN sont retenues. Ainsi, toutes les analyses sont faites sur les deux bases de données à 0h, 3h, 6h, 9h, 12h, 15h, 18h et 21h (heure universelle) uniquement. Cependant, lorsqu'un événement de givrage atmosphérique ou de givrage atmosphérique récent (RE) tombe à l'extérieur de ces heures, e.g. à 5h ou 19h, il est retenu comme événement de givrage atmosphérique au pas de temps suivant. Cela signifie que la période de givrage atmosphérique de 5h est déplacée à 6h, et celle de 19h à 21h. De cette manière, un maximum d'information sur les événements de givrage atmosphérique est conservé, même s'il en résulte que l'exactitude temporelle des événements est un peu détériorée. Outre cela, les deux bases de données sont ajustées à l'heure locale du Québec, soit l'heure universelle moins cinq heures.

Tout au long du présent mémoire, lorsqu'il y a ou prédiction ou observation de givrage atmosphérique à un pas de temps donné, cet instant de givrage atmosphérique est désigné ici comme un *événement* de givrage atmosphérique afin de simplifier les descriptions. Ensuite, il est considéré tout au long de la présente étude que lorsqu'il y a givrage atmosphérique à un pas de temps, cela représente un événement de givrage atmosphérique d'une durée de trois heures puisque telle est la résolution temporelle des données de la RRAN. Dans le reste de ce mémoire, les heures de givrage prédites et observées sont calculées selon cette hypothèse. Il en va de soi que ceci ajoute un élément d'incertitude aux heures de givrage atmosphérique observées.

### 3.2.2 Traitements spatiaux

Puisque les coordonnées spatiales des aéroports ne coïncident pas nécessairement avec des points de maille du maillage de la RRAN, les conditions climatiques à l'aéroport sont une moyenne pondérée des conditions climatiques des quatre points de grille de la RRAN les plus près. La pondération se fait en fonction de la distance horizontale entre l'aéroport et chaque point de maille. La figure 3.4 ci-dessous schématise ces distances, avec  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  et  $d_4$

représentant les distances entre l'aéroport et les points de maille un, deux, trois et quatre respectivement. Le facteur de pondération  $p_i$  pour chaque point  $i$  est calculé avec l'équation 3.1.



**Figure 3.4** Schéma illustrant les distances entre l'aéroport et les quatre points de maille RAN les plus près.

$$p_i = \frac{(\sum_{k=1}^4 d_k) - d_i}{3 \sum_{k=1}^4 d_k} \quad (3.1)$$

Pour les événements dichotomiques, telle que la prévision de pluie verglaçante, la pondération est faite de la même manière que pour les variables continues. Toutefois, le résultat à chaque pas de temps est non plus une valeur discrète de zéro ou de un, mais un chiffre variant de zéro à un. Ainsi, il faut établir une limite à partir de laquelle on considère que le phénomène se produit. Dans le cadre de cette étude, le seul paramètre dichotomique utilisé est la prévision de pluie verglaçante et la limite est établie à 0.25. Physiquement, cela signifie que si l'aéroport se trouve à distance égale des quatre points de maille les plus près et qu'il y a une prévision de pluie verglaçante à au moins l'un de ces points, on considère qu'il tombe de la pluie verglaçante à l'aéroport aussi. Une brève analyse à l'annexe III permet de constater que cette limite est celle qui assure la meilleure concordance dans le temps entre les prévisions de pluie verglaçante et les observations de précipitations givrantes.

Un autre traitement spatial concerne le niveau vertical des données. La plupart des informations de la RAN nécessaires à la validation des méthodes de prédiction des événements de givrage atmosphérique sont disponibles à des hauteurs fixes au-dessus du niveau du sol (deux, dix et 30 mètres). Dans ce cas, les données sont prises à deux mètres, car les données d'aéroport décrivent le climat très près du sol. Toutefois, certaines données RAN sont seulement disponibles aux niveaux de pression, dont la hauteur à partir du sol varie dans le temps et dans l'espace. Dans ce cas, à chaque pas de temps, les données RAN nécessaires sont extraites

du niveau de pression au dessus du sol se trouvant le plus près du sol. Dans ce cas, une extrapolation à partir des deux niveaux de pression les plus près du sol n'aurait pas nécessairement donné une meilleure approximation (Benoît, 2007).

Il importe aussi de préciser comment est utilisée la hauteur de la base des nuages. Ce paramètre exprime l'altitude de la base des nuages par rapport au niveau de la mer. Afin de savoir quelle est la hauteur à partir du niveau du sol des nuages, l'altitude au dessus du niveau de la mer du point de la RRAN est soustraite de l'altitude au-dessus du niveau de la mer de la base des nuages. Cette soustraction est effectuée pour chacun des quatre points de la RRAN les plus près d'un aéroport et, ensuite, le résultat est pondéré avec les poids définis par l'équation 3.1.

Le tableau qui suit (tableau 3.3) indique les coordonnées des aéroports ainsi que leur élévation par rapport au niveau de la mer. Sont aussi indiquées les élévations par rapport au niveau de la mer des quatre points de grille les plus près, d'où les variables météorologiques de la RRAN sont interpolées. Il est possible de voir que pour les aéroports de Mirabel et Chibougamau-Chapais, les élévations des points de grille sont près de l'élévation réelle des aéroports. Pour Gaspé, Mont-Joli, Québec et Bagotville, certains des points de maille se trouvent plus bas ou beaucoup plus haut que l'aéroport. Puisque les conditions climatiques changent en fonction de l'altitude, il est important d'être conscient de l'écart qui existe entre les aéroports et les points de maille qui seront utilisés pour la modélisation des climats givrants aux sites de validation.

### 3.2.3 Calcul de la teneur en eau liquide

Parmi les paramètres météorologiques disponibles dans les données de la RRAN, il y a l'eau dans les nuages, qui, plus précisément, correspond à la masse d'eau par masse d'air sec (dans la base de données de la RRAN, ce paramètre se s'appelle le « cloud liquid water mixing ratio »). Ce paramètre peut être converti en teneur en eau liquide, qui exprime la masse d'eau par volume d'air, avec l'équation 3.2.

$$TEL = E_{nuages} \rho \quad (3.2)$$

où  $E_{nuages}$  est le rapport de mélange de l'eau dans les nuages,  $\rho$  la densité de l'air, et  $TEL$ , la teneur en eau liquide. La densité de l'air humide n'est pas un paramètre de la base de données de la RRAN, mais il peut être calculé à partir de l'équation 3.3 ci-dessous (The Engineering Toolbox, 2008) :



Tableau 3.3

Longitude, latitude et élévation des aéroports et des points de maille de la RRAN utilisés

Stations	Latitude Longitude (°)	Élévation (m)	Élévation des points RRAN (m)
<b>Gaspé</b>	48.767, 64.467	32.9	0.0, 0.0, 378.9, 115.1
<b>Mt-Joli</b>	48.600, 68.217	52.4	0.0, 378.9 0.0, 0.0
<b>Québec</b>	46.783, 71.367	74.1	115.1, 115.1 115.1, 486.5
<b>Chiboug.</b>	49.767, 74.517	387.1	378.9, 378.9 378.9, 378.9
<b>Mirabel</b>	45.667, 74.017	82.3	63.25, 63.25 63.25, 63.25
<b>Bagot.</b>	48.167, 71.000	159.1	708.3, 378.9 276.9, 378.9

$$\rho = \frac{P}{R_a T} \left( \frac{1 + x}{1 + x \frac{R_v}{R_a}} \right) \quad (3.3)$$

Dans cette dernière équation,  $P$  est la pression de l'air,  $R_a$  la constante des gaz parfaits pour l'air,  $T$  la température de l'air,  $x$  l'humidité spécifique, et  $R_v$  la constante des gaz pour la vapeur d'eau.

### 3.2.4 Données manquantes

Dans les données de la RRAN, il y a un infime pourcentage de données manquantes. Pour les six années de données et les six stations METAR, il y a en moyenne 1.07 % de données manquantes (c'est-à-dire de périodes horaires sans données). L'année 2001 a le plus grand pourcentage de données manquantes avec 3.72 % de données manquantes, et l'année 2004 le moins, avec 0.27 % de données manquantes.

### 3.3 Méthodologie

Cette section décrit en premier lieu les outils qui sont utilisés pour évaluer les différents modèles de prédiction des événements de givrage atmosphérique. Ensuite, elle décrit les modèles et le processus d'évaluation de ces modèles.

#### 3.3.1 Indices de performance

Pour analyser la performance de modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique, il importe de définir des indices de performance. Ici, six indices de performance sont définis, permettant tous de voir une différente facette des résultats. Il est tout d'abord intéressant de savoir si les modèles testés prévoient un nombre d'heures de givrage atmosphérique similaire ou très différent du nombre d'heures observé. L'indice  $D_h$  désigne la différence entre le nombre d'heures de givrage atmosphérique prédit annuellement,  $P_i$  et observé annuellement,  $O_i$ . Toujours pour les heures de givrage par an, il est possible de calculer le coefficient de détermination,  $R^2$ , entre les heures de givrage atmosphérique prédites et observées. Ce coefficient se calcule avec l'équation 3.4.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (PC_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \quad (3.4)$$

Dans cette équation, les valeurs  $PC_i$  sont appelées *prédictions corrigées* et représentent les valeurs données par la droite des moindres carrés entre les heures de givrage prédites,  $P_i$ , et les heures observées,  $O_i$ . La variable  $\bar{O}$  représente les heures observées moyennées sur les six stations et les six années de données ( $n = 36$ ). La valeur de  $R^2$  peut être interprétée comme représentant le montant de variabilité des données d'observations qui est pris en compte par le modèle de la droite des moindres carrés.

Ces deux indices informent sur les heures de givrage atmosphérique prédites et observées, mais ne donnent aucune information quant à la concordance dans le temps entre les événements prédits et observés. Pour vérifier la validité d'une prévision ou d'une prédiction dichotomique dans le temps, il convient de construire une table de contingence illustrant toutes les situations possibles (Wilks, 1995). Le tableau 3.4 est la table de contingence qui s'applique à la situation étudiée ici. La table se lit de la manière suivante. Dans les colonnes se trouvent les observations, et dans les lignes, les prédictions. Quand une prédiction indique du givrage atmosphérique (prédiction *oui*) et que l'observation correspondante au même moment en in-

dique aussi (observation *oui*), alors la prédiction est correcte ( $C$ ). Si à ce même moment les observations n'indiquent pas de givrage atmosphérique (observation *non*), alors la prédiction est une fausse alarme ( $F$ ). De la même manière sont définies les observations manquées ( $M$ ) et les prédictions *non* correctes ( $C_N$ ). La dernière ligne et la dernière colonne représentent les totaux.

Tableau 3.4

Table de contingence

	<b>observations <i>oui</i></b>	<b>observations <i>non</i></b>	
<b>prédictions <i>oui</i></b>	prédictions correctes ( $C$ )	fausses alarmes ( $F$ )	prédictions <i>oui</i> totales ( $C+F$ )
<b>prédictions <i>non</i></b>	observations manquées ( $M$ )	prédictions <i>non</i> correctes ( <i>non</i> ) ( $C_N$ )	prédictions <i>non</i> totales ( $M+C_N$ )
	observations <i>oui</i> totales ( $C+M$ )	observations <i>non</i> totales ( $F+C_N$ )	<b>grand total</b> ( $C+M+F+C_N$ )

À l'aide des variables de cette table de contingence, il est possible de calculer plusieurs indicateurs qui permettent de vérifier si les événements prédits ont lieu au même moment que les événements observés. Dans le cas de la prédiction d'événements givrants, l'objectif est de maximiser les prédictions correctes ( $C$ ), et de minimiser les fausses alarmes ( $F$ ) ainsi que les observations manquées ( $M$ ) et, finalement, de maximiser les prédictions de non-givrage correctes ( $C_N$ ). Puisque les événements de givrage sont plutôt rares par rapport aux événements de non-givrage,  $C_N$  sera toujours très important, donc sa valeur n'apporte pas une information très utile dans le présent cas. Afin de maximiser  $C$  tout en minimisant  $M$  et  $F$ , on peut utiliser l'indice de succès critique ( $CSI$ , de l'anglais « **C**ritical **S**ucces **I**ndex »), qui se calcule de la manière suivante (équation 3.5) :

$$CSI = \frac{C}{C + M + F} \quad (3.5)$$

Lorsqu'il n'y a ni fausses alarmes, ni observations manquées, la valeur du  $CSI$  sera de 1 (score parfait). S'il n'y a aucune prédiction correcte ou bien s'il y a un très grand nombre de fausses



alarmes ou d'observations manquées, la valeur du *CSI* sera très petit ou nul. Dans le cadre de la présente étude, il n'est pas considéré nécessaire que les événements prédits et observés aient lieu *exactement* au même moment, mais dans un intervalle de temps *restreint*. Cet intervalle a été fixé à plus ou moins 12 h. Une analyse préliminaire des données a indiqué qu'un intervalle plus grand n'améliore pas les résultats et qu'un intervalle plus court devient trop restrictif. Ainsi, chaque prédiction correcte (*C*) se trouve dans plus ou moins 12 h d'un événement observé, une fausse alarme (*F*) ne trouve aucun événement observé dans plus ou moins 12 h et une observation manquée (*M*) est une observation qui ne trouve pas d'événement prédit dans plus ou moins 12 h.

Avec les variables de la table de contingence (tableau 3.4), il est possible de calculer une variété d'autres indices, mais ici il est seulement question d'en calculer deux autres. Tout d'abord, la probabilité de détection (*POD*), qui correspond au nombre de prédictions correctes sur le nombre d'observations totales (équation 3.6) et le taux de fausses alarmes (*FAR*, équation 3.7), qui est le ratio des fausses prédictions sur les prédictions totales.

$$POD = \frac{C}{C + M} \quad (3.6)$$

$$FAR = \frac{F}{C + F} \quad (3.7)$$

Ces deux indices varient de zéro à un, avec comme une valeur idéale pour le *POD* de un, et une valeur idéale de zéro pour le *FAR*.

Finalement, le dernier indice de performance est un indice relatif au domaine de l'énergie éolienne. Baptisé le *ERR<sub>aep</sub>*, pour l'erreur (*ERR*) sur l'estimation de la production d'énergie annuelle (*aep* de l'anglais « **a**nnual **e**nergy **p**roduction »), il évalue le pourcentage d'erreur sur l'estimation de la production d'énergie annuelle que cause la modélisation du givrage atmosphérique. Le *ERR<sub>aep</sub>* s'exprime de la manière suivante (équation 3.8) :

$$ERR_{aep} = 100 \frac{\sum_i^{N_i} \rho_i u_i^3 - \sum_j^{N_j} \rho_j u_j^3}{\sum_k^{N_k} \rho_k u_k^3} \quad (3.8)$$

Dans l'équation 3.8,  $\rho$  est la densité de l'air,  $u$  la vitesse du vent, et les indices  $i$ ,  $j$  et  $k$  représentent respectivement : les pas de temps où un événement de givrage est prédit, les pas de temps où un événement de givrage est observé et tous les pas de temps dans l'année.  $N_i$  est le nombre total d'événements prédits,  $N_j$  le nombre total d'événements observés et  $N_k$  le nombre total de pas de temps dans l'année (2920 pour les années régulières et 2928 pour les années bissextiles).

Lorsque la quantité d'énergie disponible dans le vent pendant les heures de givrage atmosphérique prédites est égale à la quantité d'énergie disponible dans le vent pendant les heures de givrage atmosphérique observées, l'indice  $ERR_{aep}$  est nul. Il est important de mentionner que l'équation 3.8 n'inclut pas de facteur de pertes d'énergie dues aux accrétions de givrage atmosphérique, car l'estimation des pertes de puissances est au-delà du cadre de cette recherche. Pour cette même raison, la persistance des accrétions n'est pas estimée. Ainsi, il ne faut pas interpréter l'indice  $ERR_{aep}$  comme une indication des pertes, mais uniquement comme un outil d'évaluation.

Chaque indice de performance est calculé pour chaque méthode à évaluer. Pour tous les indices de performance définis, sauf le coefficient de détermination ( $R^2$ ), les indices sont moyennés sur les six stations et les six années.

Les deux indices considérés les plus importants pour l'analyse sont le coefficient de détermination,  $R^2$ , et le  $CSI$ . Le  $CSI$  permet de tenir compte de plusieurs types de défauts. S'il y a beaucoup plus d'heures prédites qu'observées, ou l'inverse, cela est reflété dans la valeur du  $CSI$ . Si le nombre d'événements observés et le nombre d'événements prédits sont très proches, mais que les prédictions et les observations n'ont pas lieu au même moment, ce sera aussi reflété dans la valeur du  $CSI$ . Le coefficient de détermination lui,  $R^2$ , permet de voir, indépendamment de la concordance dans le temps entre les événements prédits et observés, s'il y a un lien entre le nombre d'heures annuel de givrage atmosphérique prédit et le nombre d'heures annuel de givrage atmosphérique observé. Un lien peut être établi même si le nombre d'heures prédit est inférieur ou supérieur au nombre d'heures observé.

### 3.3.2 Modèles à évaluer

Au chapitre 1 sont décrits divers modèles simples d'estimation des périodes de givrage atmosphérique. Comme il l'a été mentionné, les données de la RRAN possèdent plusieurs paramètres météorologiques, mais pas la teneur en eau surfondue, donc le modèle de température

et de teneur en eau surfondue ne peut être analysé. En outre, les modèles à plus de deux paramètres ne sont pas non plus analysés. Toutefois, la prévision à trois heures de pluie verglaçante combinée avec la température peut être évaluée comme modèle de prédiction des événements de givrage atmosphérique. Les modèles à évaluer sont donc les suivants :

- température et humidité relative ( $T, HR$ ) ;
- température et hauteur de la base des nuages ( $T, HN$ ) ;
- température et visibilité ( $T, VIS$ ) ;
- température et teneur en eau liquide ( $T, TEL$ ), et ;
- température et prédiction de pluie verglaçante ( $T, PVG$ ).

Toutes ces méthodes utilisent deux paramètres météorologiques, dont un est toujours la température. Pour la présente étude, il est considéré qu'il ne peut y avoir givrage atmosphérique que lorsque la température se situe entre zéro et  $-20^{\circ}\text{C}$ , tel que dans (Schultz et Politovich, 1992). La limite inférieure est définie car des gouttelettes surfondues ont rarement été observées à des températures inférieures à cette limite (Schultz et Politovich, 1992). Par contre, pour les autres paramètres, il n'y a pas de limite fixe ; plusieurs limites sont testées de manière à explorer davantage de possibilités. Le tableau 3.5 décrit de quelle manière sont variées les limites pour les paramètres autres que la température et la prédiction de pluie verglaçante.

Tableau 3.5

Variation des limites des paramètres météorologiques

Paramètre	Varie de :	À :	Par pas de :
<i>Humidité relative (HR)</i>	$\geq 90 \%$	$\geq 100 \%$	1 %
<i>Hauteur des nuages (HN)</i>	$\leq 0 \text{ m}$	$\leq 500 \text{ m}$	50 m
<i>Visibilité (VIS)</i>	$\leq 0 \text{ m}$	$\leq 2400 \text{ m}$	200 m
<i>Teneur en eau liquide (TEL)</i>	$\geq 0 \text{ g/m}^3$	$\geq 0.12 \text{ g/m}^3$	0.01 $\text{g/m}^3$

Les méthodes appliquées donnent toutes un résultat dichotomique, c'est-à-dire qu'il y a ou givrage atmosphérique ou il n'y a pas, en opposition avec des résultats probabilistes qui donneraient une probabilité de givrage atmosphérique.



### 3.4 Bilan

Pour résumer le chapitre, les deux bases de données qui sont utilisées pour la présente étude sont décrites : les données de la RRAN, des données de modèle de PNT et des observations de givrage atmosphérique extraites des données METAR. Les sources d'incertitude sur la mesure des périodes de givrage atmosphérique des données METAR sont aussi brièvement présentées.

Afin de comparer les prédictions de givrage atmosphérique avec les observations, divers indices de performance ont été décrits. Deux indices s'appliquent aux nombre d'heures de givrage atmosphérique : le  $D_h$  représente la différence d'heures entre les heures annuelles de givrage atmosphérique prédites et observées, et le  $R^2$  est le coefficient de détermination entre les heures ou événements de givrage atmosphérique prédits et observés annuellement. Un indice estime l'erreur potentielle que peut introduire la modélisation du givrage atmosphérique dans le calcul de la production d'énergie annuelle ( $ERR_{aep}$ ). Finalement, les trois autres indices décrivent de manières différentes la concordance dans le temps entre les événements de givrage atmosphérique prédits et observés (le  $CSI$ , le  $POD$  et le  $FAR$ ). Il est à noter que deux indices, soit le  $R^2$  et le  $CSI$ , sont considérés comme les plus importants.

Les indices de performance et la méthodologie décrits dans ce chapitre pourront aussi être utilisés lorsque sera venu le temps d'analyser les données du banc d'essai décrit au chapitre 2.

## CHAPITRE 4

### RÉSULTATS DE L'ANALYSE DES MODÈLES DE PRÉDICTION DES PÉRIODES DE GIVRAGE ATMOSPHÉRIQUE

Ce chapitre présente les résultats de l'analyse des modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique énumérés au chapitre 3 et de certaines combinaisons de ces modèles. Une partie des résultats de ce chapitre sont aussi mentionnés dans les articles de comptes-rendus de conférence cités au chapitre précédent.

#### 4.1 Premiers résultats

Les premiers résultats présentés portent sur les cinq modèles identifiés à la fin du chapitre 3, soit :

- température et humidité relative ( $T, HR$ ) ;
- température et hauteur de la base des nuages ( $T, HN$ ) ;
- température et visibilité ( $T, VIS$ ) ;
- température et teneur en eau liquide ( $T, TEL$ ) , et ;
- température et prédiction de pluie verglaçante ( $T, PVG$ ).

Les résultats pour l'ensemble des stations de validation sont présentés en premier lieu. Ensuite, des résultats pour les différentes stations sont présentés, et finalement, la sensibilité des modèles est discutée.

##### 4.1.1 Résultats globaux

Les deux prochains tableaux (tableau 4.1 et 4.2) montrent les valeurs de chaque indice de performance pour chaque modèle. Le premier tableau donne les valeurs obtenues lorsqu'on maximise le  $\overline{CSI}$  (tableau 4.1), et le deuxième tableau montre les résultats lorsque l'on cherche à obtenir le meilleur  $R^2$  (tableau 4.2). Les chiffres indiquent les valeurs moyennes pour les six stations et les six années de données. Il est à noter que lorsque les années sont divisées au premier juillet au lieu du premier janvier (de manière à ne pas couper la saison d'hiver en deux), les résultats très similaires.

Le tableau 4.1 montre que le modèle qui donne les meilleurs résultats au niveau de la concordance dans le temps des événements prédits et observés est le modèle de température et de

Tableau 4.1

Résultats pour un  $\overline{CSI}$  maximum

Modèle	$\overline{CSI}$	$R^2$	$\overline{ERR}_{aep}$ (%)	$\overline{D}_h$ (h)	$\overline{POD}$	$\overline{FAR}$	Variable
$T, HR$	0.22	0.47	-0.04	121	0.60	0.70	$\geq 95$ %
$T, HN$	0.08	0.07	6.12	703	0.71	0.85	$\leq 100$ m
$T, VIS$	0.11	0.04	4.30	408	0.61	0.84	$\leq 1200$ m
$T, TEL$	0.25	0.01	-0.01	26	0.44	0.64	$\geq 0.06$ g/m <sup>3</sup>
$T, PVG$	0.36	0.00	-0.24	-17	0.49	0.38	-

Tableau 4.2

Résultats pour un  $R^2$  maximum

Modèle	$\overline{CSI}$	$R^2$	$\overline{ERR}_{aep}$ (%)	$\overline{D}_h$ (h)	$\overline{POD}$	$\overline{FAR}$	Variable
$T, HR$	0.12	0.53	3.35	551	0.83	0.77	$\geq 92$ %
$T, HN$	0.02	0.10	-0.36	4	0.09	0.87	$\leq 0$ m
$T, VIS$	0.08	0.07	0.77	151	0.23	0.86	$\leq 200$ m
$T, TEL$	0.03	0.02	41.94	2957	0.92	0.92	$\geq 0.00$ g/m <sup>3</sup>
$T, PVG$	0.36	0.00	-0.24	-17	0.49	0.38	-

prévision de pluie verglaçante. Ce modèle donne un  $\overline{CSI}$  de 0.36. Il est suivi du modèle de température et de teneur en eau liquide, avec un  $\overline{CSI}$  de 0.25, et du modèle de température et d'humidité relative, avec un  $\overline{CSI}$  de 0.22. Les modèles utilisant les paramètres de hauteur de la base des nuages et de visibilité montrent une très faible performance pour le  $\overline{CSI}$ . De plus, ils surestiment énormément les heures de givrage atmosphérique, et par conséquent, ont une valeur élevée pour le  $\overline{ERR}_{aep}$  et le  $\overline{FAR}$ . Cela explique aussi pourquoi ils ont une probabilité de détection assez élevée (0.71 et 0.61). Les conditions imposées sont très générales, donc fréquemment satisfaites et elles englobent forcément une bonne partie des observations de givrage atmosphérique.

Lorsqu'il est question de maximiser le  $\overline{CSI}$ , tous les modèles, sauf celui usant l'humidité relative (avec l'humidité relative plus grande ou égale à 95 %), montrent un coefficient de



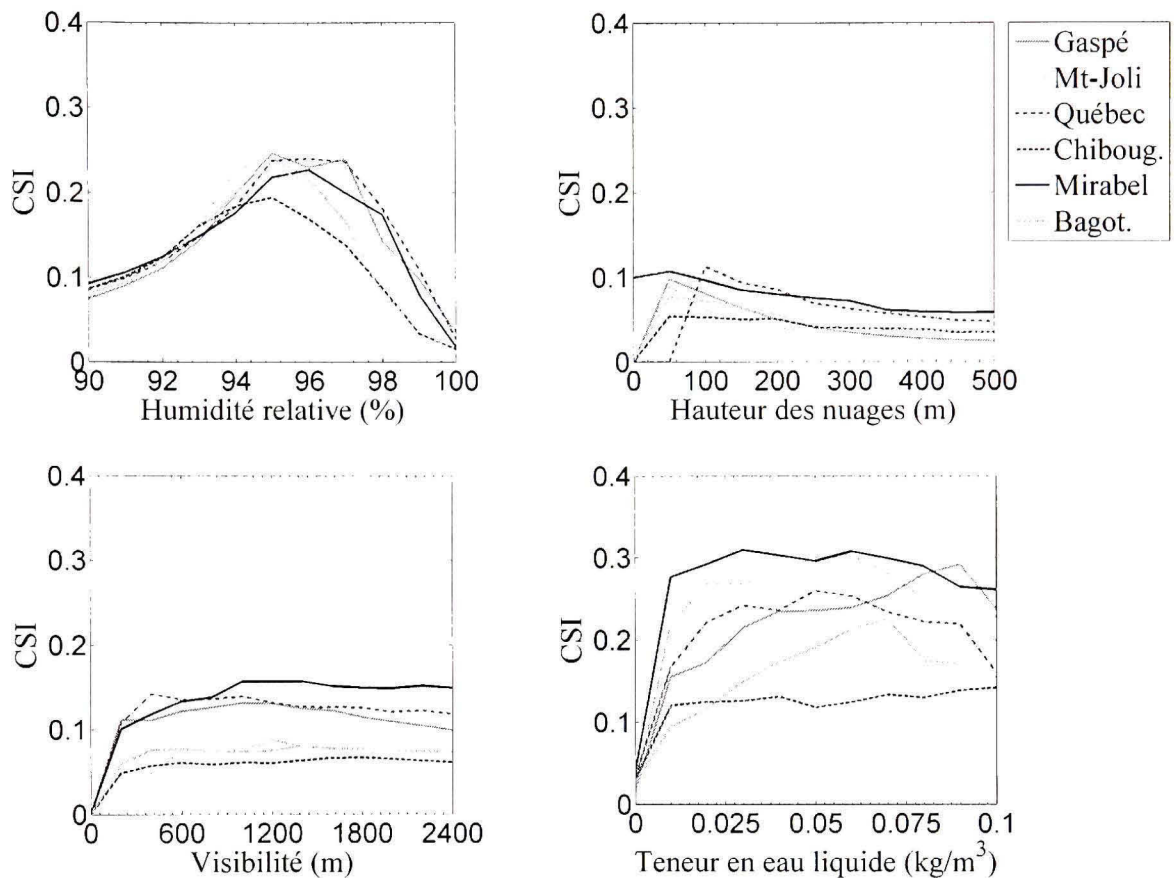
détermination presque nul. Le coefficient de détermination de ce dernier est de 0.47. Jusqu'ici il est clair que maximiser le  $\overline{CSI}$  ne permet pas, en même temps, de maximiser le  $R^2$ . Dans le cas du modèle de température et de prévision de pluie verglaçante, le lecteur peut voir que la probabilité de détection est moyenne (0.47). Ainsi, même si ce modèle a le meilleur  $\overline{CSI}$ , il reste que plus de la moitié des événements observés ne sont pas détectés. Ces événements non détectés, combinés aux taux de fausses alarmes (0.38), correspondent à plusieurs heures de givrage atmosphérique et cela peut expliquer pourquoi il n'y a pas de corrélation entre le nombre d'heures de givrage atmosphérique observé et prédit, même si ce modèle procure le meilleur  $\overline{CSI}$ .

Dans le tableau 4.2, où les résultats sont données pour un  $R^2$  maximum, la valeur maximale atteignable du coefficient de détermination est de 0.53, et ce, pour le modèle faisant appel à l'humidité relative (avec l'humidité relative plus grande ou égale à 92 %). Ainsi, environ la moitié de la variation dans les prédictions du modèle est attribuable à une variation dans les observations. En d'autres mots, pour une partie des données annuelles de givrage atmosphérique, les heures de givrage prédites augmentent ou diminuent quand les heures observées augmentent ou diminuent. La figure 4.2 montre la régression linéaire et le nuage de points de ce modèle. Le tableau 4.2 montre aussi que les autres modèles, même lorsque le coefficient de détermination est maximisé, donnent de faibles corrélations.

En regardant le tableau 4.2 plus en détail, il peut être remarqué que le modèle de température et d'humidité relative indique un nombre d'heures de givrage beaucoup plus élevé que le nombre d'heures observé. Il donne, par conséquent, une valeur de  $\overline{ERR}_{aep}$  élevée, un  $\overline{POD}$  élevé et un  $\overline{FAR}$  élevé. Encore une fois, cela signifie que les conditions imposées sont très générales et qu'elles sont souvent satisfaites.

#### 4.1.2 Résultats par station et sensibilité des modèles

Pour mieux comprendre les résultats présentés, on peut considérer chaque aéroport séparément. En parallèle à ceci, il est possible de voir si les modèles sont sensibles à la limite imposée à leur deuxième variable (humidité relative, hauteur des nuages, visibilité et teneur en eau liquide). Les graphiques regroupés dans la figure 4.1 illustrent l'évolution du  $\overline{CSI}$  pour chaque station en fonction de la limite choisie pour chaque modèle. Pour le modèle de température et de pluie verglaçante, qui n'a pas de paramètre variant, le  $\overline{CSI}$  est de 0.33 pour Gaspé, de 0.32 pour Mont-Joli, de 0.38 pour Québec, de 0.33 pour Cibougamau-Chapais, de 0.42 pour Mirabel et de 0.39 pour Bagotville.



**Figure 4.1** Valeur du CSI par modèle et par station.

La figure 4.1 montre que les résultats entre les différentes stations varient surtout pour le modèle qui fait appel à la teneur en eau liquide. Mirabel atteint un  $\overline{CSI}$  d'un peu plus de 0.3 alors que pour l'aéroport de Chibougamau-Chapais, le  $\overline{CSI}$  demeure inférieur à 0.15. Il ne semble pas y avoir de lien entre cette différence de performance et la fréquence de givrage atmosphérique aux deux stations. Les deux stations ont aussi les mêmes pourcentages d'événements de précipitations givrantes et de brouillards givrants. De plus, les climats aux aéroports sont modélisés en utilisant des points de grille de la RRAN qui sont à une altitude similaire à l'altitude réelle des aéroports. Ainsi, il est possible que ces écarts de performances soient plutôt dus à des conditions atmosphériques différentes lors de givrage atmosphérique.

Après le modèle de température et de teneur en eau liquide, le modèle de température et de pluie verglaçante est celui pour lequel les résultats varient le plus d'un aéroport à l'autre. Le  $\overline{CSI}$  varie de 0.32 pour l'aéroport de Mont-Joli, à 0.42 pour Mirabel. Ici aussi, il y a écart notable entre l'aéroport de Mirabel et celui de Chibougamau-Chapais.

Les graphiques de la figure 4.1 révèlent que c'est surtout le modèle de température et d'humidité relative qui est sensible à la limite d'humidité relative imposée. Les résultats des modèles qui utilisent la hauteur de la base des nuages et la visibilité sont presque constants et près de zéro. Ainsi, il semble n'y avoir aucun lien entre les périodes de givrage atmosphérique et les résultats de ces deux modèles. Pour ce qui en est du modèle de température et de teneur en eau liquide, le scénario est similaire, toutefois, les valeurs du  $\overline{CSI}$  sont plus élevées et varient davantage. Par conséquent, ce paramètre des données de la RRAN a peut-être une certaine valeur dans la prédiction des périodes de givrage atmosphérique à certains aéroports.

Pour évaluer la variabilité du coefficient de détermination entre les aéroports, il est pertinent de regarder au modèle de température et d'humidité relative seulement, puisque les autres modèles donnent de très faibles valeurs de  $R^2$ . Étant donné que, pour chaque station, il n'y a que six ans de données (donc six mesures du nombre d'heures de givrage annuel), c'est peu pour calculer une corrélation et un coefficient de détermination par station. Pour se faire une idée de la variabilité des résultats en fonction des stations, le prochaine graphique (figure 4.2) trace donc la régression linéaire et le nuage de points entre les prédictions et observations pour les six stations et les six années pour une valeur d'humidité relative plus grande ou égale à 92 % (là où le  $R^2$  est maximum). Cette figure montre que, pour tous les aéroports, il y a beaucoup de dispersion autour de la régression linéaire. Aucun aéroport ne démontre de comportement fortement en accord avec la régression linéaire, et aucun ne montre considérablement plus de dispersion que les autres.

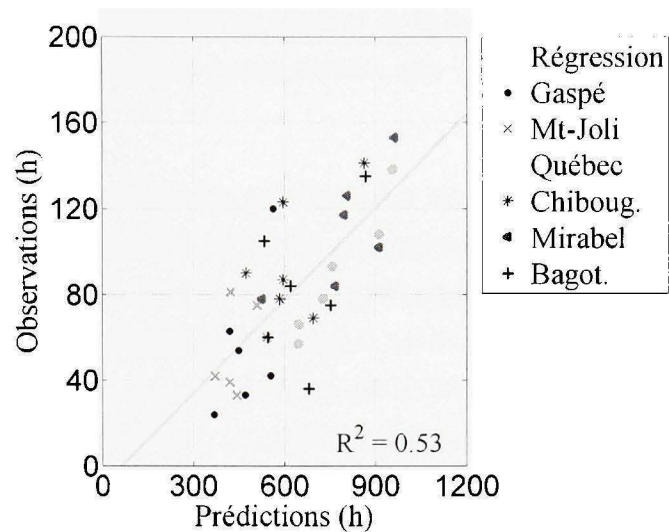
La prochaine figure (figure 4.3) montre comment le coefficient de détermination varie en fonction de la limite d'humidité relative choisie. Le coefficient de détermination atteint un maximum lorsque l'humidité relative est plus grande ou égale à 92 %, pour ensuite redescendre graduellement. L'incertitude sur les valeurs d'humidité relative de la RRAN n'est pas connue, mais le compte-rendu de conférence (Comeau *et al.*, 2007) montre une forte corrélation entre le point de rosée des observations et de la RRAN.

## 4.2 Résumé des résultats

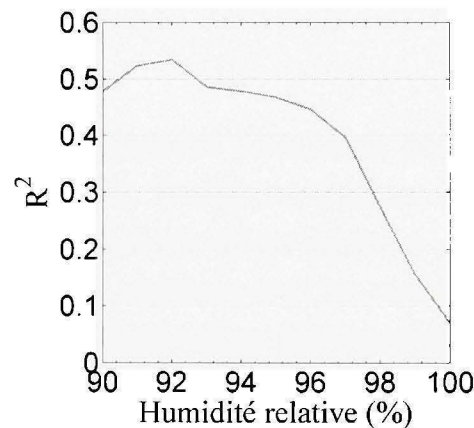
Pour résumé, les résultats montrent que :

- la valeur maximale du  $\overline{CSI}$  est obtenue avec le modèle  $T, PVG$  ;
- la valeur maximale du  $R^2$  est obtenue avec le modèle  $T, HR$  avec l'humidité relative plus grande ou égale à 92 % ;





**Figure 4.2** Régression linéaire et nuage de points pour le modèle  $T$ ,  $HR$  avec  $HR \geq 92\%$ .



**Figure 4.3** Valeur du  $R^2$  en fonction de la limite d'humidité relative.

- il n'y a pas de méthode qui permette à la fois de maximiser le  $\overline{CSI}$  et le  $R^2$  ;
- il existe certaines différences entre la performance des différents aéroports, surtout pour les modèles qui utilisent la teneur en eau liquide et la prévision de pluie verglaçante ;
- tous les aéroports montrent beaucoup de dispersion autour de la régression linéaire de la figure 4.2 ;
- le modèle de température et d'humidité relative est celui pour lequel les résultats sont les plus sensibles à la variation de son paramètre, les résultats des autres modèles varient peu ou pas en fonction de la variation de leur paramètre, et ;

- les modèles utilisant les variables de hauteur de la base des nuages ( $T, HN$ ) et de visibilité ( $T, VIS$ ) ne performant bien à aucun niveau, que l'on cherche à maximiser le  $\overline{CSI}$  ou le  $R^2$ .

Les résultats des analyses effectuées peuvent avoir plusieurs causes. Tout d'abord, le givrage atmosphérique est un phénomène complexe, qui, physiquement, peut difficilement être résumé à deux variables. Deuxièmement, puisque les phénomènes de givrage atmosphérique peuvent être très localisés, avec un maillage de 32 km il est évident qu'il est impossible de modéliser et de détecter correctement des phénomènes qui se produisent sur une plus petite échelle. La topographie et les étendues d'eau, qui peuvent influencer les phénomènes de givrage atmosphérique, ne peuvent pas être parfaitement reproduites dans ce modèle. Finalement, la qualité des données de réanalyse peut aussi avoir un grand impact. Cependant, évaluer l'exactitude des données de la RRAN dépasse le cadre de la présente étude et les documents qui abordent cette questions sont citées au chapitre 3. Le lecteur peut aussi consulter le site de la RRAN où plusieurs autres documents sont disponibles.

### 4.3 Deuxièmes résultats

L'ensemble des résultats rend souhaitable l'analyse de modèles plus avancés, utilisant plus de deux variables météorologiques. Puisque la prévision de pluie verglaçante semble avoir une certaine valeur pour les événements de précipitations givrantes, il peut être intéressant de garder cette variable et de la combiner avec les autres modèles. En d'autres mots, les nouveaux modèles à analyser indiqueront un événement de givrage atmosphérique lorsque soit le critère de température et de prévision de pluie verglaçante est satisfait, soit lorsque le critère de température et de l'une des quatre autres variables est satisfait, soit les deux. Les quatre prochains modèles à analyser sont donc :

- température, prévision de pluie verglaçante et humidité relative ( $T, PVG, HR$ ) ;
- température, prévision de pluie verglaçante et hauteur de la base des nuages ( $T, PVG, HN$ ) ;
- température, prévision de pluie verglaçante et visibilité ( $T, PVG, VIS$ ), et ;
- température, prévision de pluie verglaçante et teneur en eau liquide ( $T, PVG, TEL$ ).

Les prochains tableaux montrent les résultats pour les quatre modèles lorsque le  $\overline{CSI}$  est maximisé (tableau 4.3) et lorsque le  $R^2$  est maximisé (tableau 4.4).

Ces résultats montrent que ces modèles à trois paramètres ne sont pas en mesure d'améliorer les résultats obtenus précédemment. Le  $\overline{CSI}$  maximal est toujours obtenu lorsque le rôle

Tableau 4.3  
Résultats pour un  $\overline{CSI}$  maximum (2<sup>ième</sup> analyse)

Modèle	$\overline{CSI}$	$R^2$	$\overline{ERR}_{aep}$ (%)	$\overline{D}_h$ (h)	$\overline{POD}$	$\overline{FAR}$	Variable
$T, PVG, HR$	0.36	0.00	-0.23	-16	0.49	0.38	$\geq 100 \%$
$T, PVG, HN$	0.32	0.10	0.28	66	0.52	0.46	$\leq 0$ m
$T, PVG, VIS$	0.36	0.00	0.71	-17	0.49	0.38	$\leq 0$ m
$T, PVG, TEL$	0.33	0.00	-0.02	17	0.54	0.49	$\geq 0.12$ g/m <sup>3</sup>

Tableau 4.4  
Résultats pour un  $R^2$  maximum (2<sup>ième</sup> analyse)

Modèle	$\overline{CSI}$	$R^2$	$\overline{ERR}_{aep}$ (%)	$\overline{D}_h$ (h)	$\overline{POD}$	$\overline{FAR}$	Variable
$T, PVG, HR$	0.12	0.53	3.42	559	0.84	0.77	$\geq 92 \%$
$T, PVG, HN$	0.32	0.10	0.28	66	0.52	0.46	$\leq 0$ m
$T, PVG, VIS$	0.18	0.07	1.41	214	0.62	0.74	$\leq 200$ m
$T, PVG, TEL$	0.03	0.02	41.94	2957	0.92	0.92	$\geq 0.00$ g/m <sup>3</sup>

de la troisième variable est minimisé. C'est-à-dire que le  $\overline{CSI}$  est à son maximum lorsque l'humidité relative, la hauteur des nuages, la visibilité ou la teneur en eau liquide contribue le moins d'événements de givrage atmosphérique possible aux modèles. Pour ce qui est en du  $R^2$ , celui-ci n'atteint pas non plus une valeur plus élevée qu'à la section 4.1. Le  $R^2$  maximum est de 0.53, et ce, pour le modèle de température, prévision de pluie verglaçante et humidité relative avec l'humidité relative plus importante ou égale à 92 %. Ce résultat est identique au résultat de la section 4.1. En effet, étant donné que le modèle de température et d'humidité relative prévoit beaucoup plus d'heures de givrage atmosphérique qu'il en est observé, l'ajout des heures de givrage de la prévision de pluie verglaçante est négligeable, donc le coefficient de détermination reste le même.

Les résultats des différentes stations et la sensibilité des modèles de cette deuxième analyse ne sont pas étudiés puisque les résultats ne montrent pas d'amélioration par rapport aux résultats précédents.



#### **4.4 Bilan**

À la suite de ces analyses, il est évident qu'une très bonne modélisation des périodes de givrage atmosphérique avec les données disponibles nécessite un travail plus poussé. Maintes combinaisons de paramètres sont possibles avec les variables météorologiques utilisées dans le présent travail, et ce ne sont que cinq des multiples variables disponibles dans la base de données de la RRAN. Ainsi, différents types d'algorithmes de recherche plus complexes pourraient être analysés. De plus, il serait possible de travailler avec un plus grand nombre d'aéroports ou avec un plus grand nombre d'années de données. Toutefois, cela dépasse le cadre de la présente étude et la suite du mémoire passe à l'application des résultats qu'il a été possible d'obtenir jusqu'ici.

## CHAPITRE 5

### APPLICATION D'UN MODÈLE D'ESTIMATION DES HEURES DE GIVRAGE ATMOSPHERIQUE

Des modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique analysés au chapitre précédent, deux ressortent comme pouvant avoir du potentiel : le modèle de température et d'humidité relative et le modèle de température et de prévision de pluie verglaçante. Le modèle de température et d'humidité relative (avec une humidité relative plus grande ou égale à 92 %) est celui qui démontre la relation la plus forte entre le nombre annuel d'heures de givrage atmosphérique prédit et observé ( $R^2 = 0.53$ ), et le modèle de température de prévision de pluie verglaçante est celui pour lequel la correspondance dans le temps entre les événements de givrage atmosphérique prédits et observés est la meilleure ( $\overline{CSI} = 0.36$ ). L'objectif du chapitre est de voir dans quelle mesure il est possible d'estimer le nombre d'heures annuel moyen de givrage atmosphérique pour n'importe quel site dans le sud du Québec avec un de ces modèles. Puisque c'est principalement le nombre d'heures qu'il est question de modéliser, la suite porte sur l'application du modèle de température et d'humidité relative.

Ce qui suit explique comment le modèle est appliqué aux 28 ans de données. Le résultat de cette application est une carte indiquant les heures moyennes annuelles de givrage atmosphérique. Celle-ci fait l'objet d'une discussion et le chapitre se termine par une conclusion sur l'utilisation possible de cette carte.

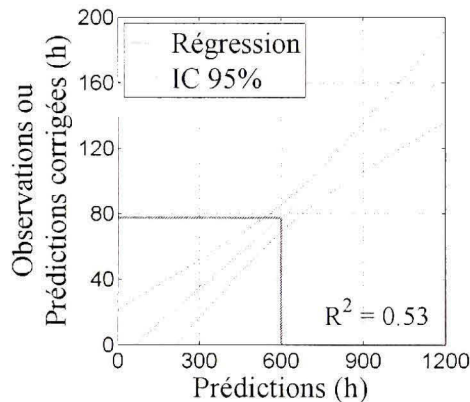
Les résultats de ce chapitre sont résumés dans l'article de comptes-rendus de la « 18<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference » (Comeau *et al.*, 2008).

#### 5.1 Application du modèle $T, HR \geq 92 \%$

Avant de passer à quelconque une application concernant le modèle de température et d'humidité relative (plus grande ou égale à 92 %), il convient d'effectuer une vérification sur le modèle. Dans le chapitre précédent, la régression linéaire et le nuage de points entre les prédictions et les observations ont été présentés (figure 4.2). L'équation de cette régression linéaire se trouve ci-dessous (équation 5.1) où  $O_i$  représente les observations et  $P_i$  représente les prédictions.

$$O_i = 0.14 P_i - 9.27 \quad (5.1)$$

Toutefois, il y a beaucoup de dispersion dans les données et la valeur du coefficient de détermination est moyenne. Il est donc souhaitable de vérifier la validité de la régression avec la méthode du « t-test », afin de s'assurer que les données ne peuvent pas être tout aussi bien modélisés par une droite dont la pente serait nulle. Ce test est effectué à l'annexe IV et il démontre qu'on peut rejeter, avec un niveau de confiance de 95 %, l'hypothèse que les données puissent être modélisées par une droite à la pente nulle. Conséquemment, l'équation 5.1 est employée dans ce chapitre pour corriger le nombre d'heures de givrage atmosphérique prédit. À l'aide de cette relation, une prédiction de 600 h de givrage peut être corrigée à 77 h plus ou moins 5 h, tel qu'illustré à la figure 5.1. À partir d'ici dans ce mémoire, le terme de prédictions corrigées (*PC*) est utilisé.



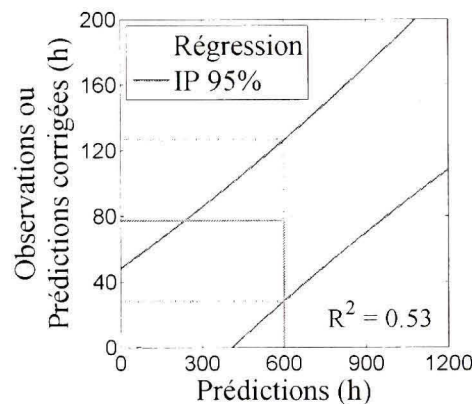
**Figure 5.1** Régression linéaire et intervalle de confiance du modèle *T*,  $HR \geq 92\%$ .

Avec cette correction statistique des prédictions, le lien avec la physique du givrage atmosphérique devient plus faible. Le modèle n'est plus uniquement basé sur des conditions atmosphériques particulières qui sont connues comme étant propices au givrage atmosphérique. Dès lors, il n'est plus possible de savoir à quel moment ont lieu les événements, ni quelles sont les conditions atmosphériques qui existent à ces moments-là. Il n'est pas non plus possible de savoir quel est le  $\overline{CSI}$  du modèle, ni de connaître la valeur des autres indices de performance définis au chapitre 3.



### 5.1.1 Intervalle de prédiction

L'intervalle de confiance (*IC*) délimite, avec un niveau de confiance de 95 %, la zone dans laquelle se trouve la régression linéaire. La zone dans laquelle, avec le même niveau de confiance, devraient se trouver les réponses (prédictions corrigées) à de futures prédictions est illustrée à la figure 5.2. Ce nouvel intervalle, l'intervalle de prédiction (*IP*), permet de voir quelle variabilité peut avoir un futur résultat autour de la moyenne des présents résultats. À la figure 5.2, il est possible de voir que la prédiction de 600 h mentionnée plus haut correspond à une prédiction corrigée de 77 h, plus ou moins 49 h.

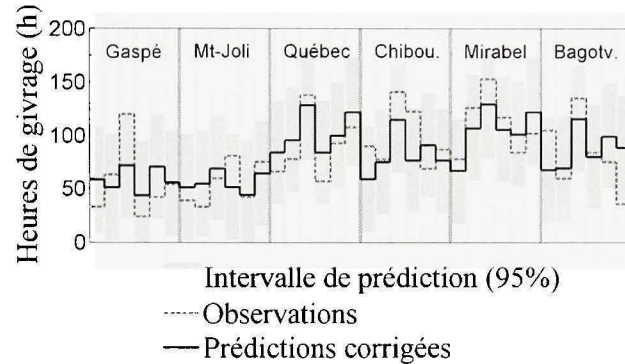


**Figure 5.2** Régression linéaire et intervalle de prédiction du modèle *T*,  $HR \geq 92\%$ .

L'intervalle de prédiction est assez large dû à la dispersion des données autour de la régression linéaire. Il est donc possible d'estimer, à environ plus ou moins 50 h, le nombre d'heures de givrage à un site donné. Puisque les heures de givrage aux sites de validations varient entre 33 et 153 h, ce plus ou moins 50 h peut représenter une incertitude considérable. Toutefois, puisqu'il existe des régions pour lesquelles aucune information sur le givrage atmosphérique n'est disponible, cette régression linéaire et son intervalle de prédiction offrent une estimation et une marge d'erreur. La figure 5.3 suivante montre l'intervalle de prédiction et les heures de givrage atmosphérique pour chacun des aéroports utilisés pour la validation. Toutes les prédictions sauf une se situent à l'intérieur de l'intervalle de prédiction.

### 5.1.2 Application du modèle

L'application du modèle se fait en imposant les critères de température et d'humidité relative à tous les points du domaine une année à la fois. Ensuite, la somme des périodes de temps



**Figure 5.3** *Régression linéaire et intervalle de prédiction du modèle T,  $HR \geq 92\%$  (les six divisions verticales par aéroport représentent les six années de données, de 2000 à 2005).*

qui satisfont ces critères est calculée. La régression linéaire de l'équation 5.1 est appliquée à cette somme pour chaque année. Finalement, la moyenne de toutes les années est calculée pour chaque point.

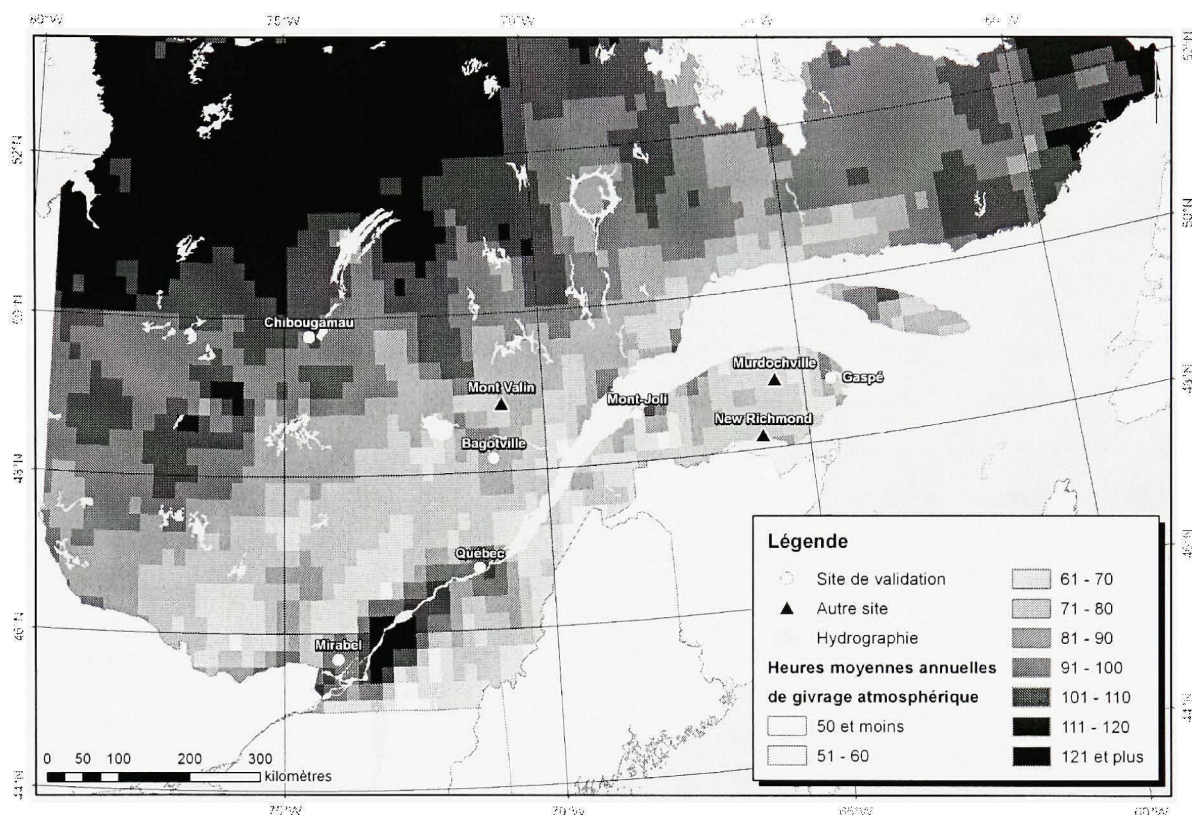
## 5.2 Présentation de la carte

La carte produite en utilisant le modèle choisi et la correction par la régression linéaire donne le résultat illustré à la figure 5.4. Comme mentionné au chapitre 3, la carte ne couvre que le sud du Québec puisque les aéroports choisis pour la validation se trouvent dans les zones écoclimatiques boréale et tempérée seulement.

Le comportement du modèle par rapport aux données de validation est connu, mais il serait normalement question d'utiliser la carte pour estimer les heures moyennes annuelles de givrage atmosphérique pour d'autres sites. Il est par conséquent question de passer en revue quatre autres sites pour lesquels certaines données sur le givrage sont disponibles afin de voir si les indications données par la carte sont représentatives de la réalité et, si non, de voir si la différence peut être expliquée. Préalablement à cela, il est intéressant de consulter les cartes de givrage publiques et existantes dans la littérature afin de voir s'il existe certaines similarités entre la carte développée ici et les autres.

### 5.2.1 Cartes existantes

Au chapitre 1, il est mentionné que certains atlas du givrage atmosphérique existent pour le Canada ou le Québec (inclus à l'annexe I) mais que ceux-ci ne décrivent que la distribution



**Figure 5.4** Carte illustrant les heures moyennes annuelles estimées de givrage atmosphérique pour le sud de la province du Québec avec le modèle de  $T, HR \geq 92\%$  et la correction statistique (présentation visuelle : Hélimax Énergie inc.).

spatiale des heures moyennes annuelles de précipitations givrantes et non celles de brouillards et brumes givrants. Ainsi, il n'est pas possible de faire une comparaison directe entre la figure 5.4 et les cartes existantes, mais il reste intéressant de les comparer afin de voir si la carte développée ici indique au moins autant d'heures de givrage atmosphérique que les autres.

Trois des cartes de l'annexe I tracent le nombre d'heures de précipitations givrantes moyennes annuelles : l'atlas de McKay et Thomson (1969) datant de 1969 (figure I.1), la carte de Stuart et Isaac (1999) (figure I.5), et celle de Cortinas Jr. *et al.* (2004) (figure I.6), toutes deux assez récentes. Ces trois cartes ont été élaborées à partir de données horaires, mais les périodes de données utilisées pour chaque carte sont variables, et par conséquent, les cartes sont différentes. Aussi, les cartes n'utilisent pas toutes le même nombre de lignes de contour ni les mêmes valeurs pour ces lignes.



Ces trois atlas identifient une plus ou moins grande zone de 50 h de givrage dans le sud-ouest du Québec, près des frontières américaine et ontarienne. Ensuite, la carte de McKay et Thomson (1969) indique une deuxième zone de 50 h dans la zone sud de la frontière entre le Québec et le Labrador. Dans la carte de Cortinas Jr. *et al.* (2004), cette zone est indiquée comme ayant une moyenne annuelle de 30 h de givrage atmosphérique, et sur la carte de Isaac et Stuart, il n'y a pas de zone de givrage plus important à cet endroit.

La carte qui apparaît à la figure 5.4 indique que presque tout le sud du Québec est soumis à des conditions de givrage atmosphérique pendant au moins 50 h par an, en moyenne. Ainsi, la carte développée indique autant ou plus d'heures de givrage que les cartes actuellement disponibles au public. Toutefois, puisqu'elle indique presque partout 50 h ou plus, il est légitime de se demander si elle n'indique pas *trop* d'heures de givrage atmosphérique à certains endroits, surtout là où il y a peu d'heures de précipitations givrantes. Au nord du fleuve St-Laurent, par exemple, les heures moyennes annuelles de givrage atmosphérique augmentent graduellement en allant vers le Nord jusqu'à atteindre 121 h et plus. Puisque le critère de givrage atmosphérique du modèle utilisé pour tracer la carte impose des conditions plutôt générales pour l'humidité relative et la température, il semble normal que le modèle indique plus d'heures de givrage atmosphérique là où les températures sont plus souvent négatives. Il est possible que pour ces régions plus froides, la corrélation linéaire appliquée pour corriger les prédictions ne soit pas adéquate.

Les autres cartes indiquent, pour la région autour du cinquante-deuxième parallèle, entre dix et 25 h pour la carte de McKay et Thomson (1969), entre 25 et 50 h pour l'atlas de Stuart et Isaac (1999), et entre 20 et 40 h pour celui de Cortinas Jr. *et al.* (2004). Ainsi, en supposant que les heures de givrage atmosphérique indiquées par la carte développée ici soient justes et que les heures indiquées par les autres cartes le soient aussi, il y aurait environ entre 30 à 110 h de brouillards et brumes givrants annuellement à certains endroits dans cette zone du Québec, ce qui peut sembler beaucoup. Parmi les aéroports utilisés pour la validation, ceux où le pourcentage de brouillards et brume givrants était le plus important sont les aéroports de Gaspé et Mont-Joli, avec 33 % des événements de givrage atmosphérique chacun. Toutefois, cela n'empêche pas qu'il y ait des sites où le givrage en nuage soit le type de givrage atmosphérique dominant. D'ailleurs, il a été mentionné au chapitre 1 que cela peut être le cas sur des sommets de montagnes ou collines. Le mont Valin par exemple, au nord de Bagotville, est plus souvent soumis à des conditions de givrage en nuages qu'à des précipitations givrantes (voir plus bas). Il est aussi possible que l'hypothèse émise au chapitre 3 selon laquelle une in-

dication de givrage atmosphérique à un pas de temps correspondrait à trois heures de givrage ne soit pas adéquate sur tout le territoire traité. Toutefois, le seul moyen de vérifier s’il y a réellement entre 30 et 110 h de brouillards et brume givrants dans cette zone est d’analyser des données sur le givrage atmosphérique de cette région.

### **5.2.2 Autres sites**

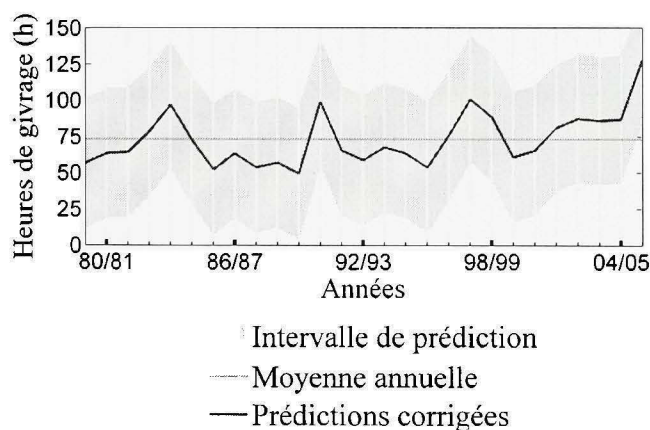
Grâce à l’analyse effectuée au chapitre précédent et avec les informations sur l’intervalle de prédiction données au début du présent chapitre, il est possible de savoir comment se comporte le modèle par rapport aux observations des six sites de validation. Afin de se faire une meilleure idée des forces et faiblesses de la carte présentée à la figure 5.4, il est intéressant d’aller au-delà de ces sites ou périodes de temps afin d’apporter un complément d’information sur l’applicabilité du modèle. Les sites choisis pour cela sont des sites qui ont été remarqués pour leurs nombreuses heures de givrage atmosphérique, ou, au contraire, pour l’absence de givrage atmosphérique.

#### **5.2.2.1 Murdochville**

Murdochville, situé dans la péninsule gaspésienne (voir la figure 5.4), est un site reconnu pour son givrage atmosphérique fréquent (Fortin *et al.*, 2006). Une multitude de données météorologiques y a été recueillie pendant deux ans, y inclut des mesures de givrage effectuées avec un givromètre d’Hydro-Québec. Cet instrument indique qu’il y a eu 79 h de givrage atmosphérique à l’hiver 2004-05 et 119 h de givrage atmosphérique à l’hiver 2005-06 (Fortin *et al.*, 2006). De la même manière que pour les sites de validation, les conditions climatiques de Murdochville sont interpolées des quatre points de maille les plus proches au site de mesure. L’élévation réelle du site est de 610 m au dessus du niveau de la mer alors que les points de maille se trouvent à 487 et 597 m au dessus du niveau de la mer. Le modèle est appliqué à ces points de maille, ainsi que la correction. Les prédictions corrigées pour Murdochville pendant ces deux hivers sont alors de 82 et de 109 h, ce qui est très proche des heures mesurées. Il semble donc que dans ce cas-ci, le modèle développé soit adéquat. Sur la carte de la figure 5.4, il est possible de voir que Murdochville se situe dans une zone où il est estimé y avoir une moyenne de 71 à 80 heures de givrage atmosphérique par an.

### 5.2.2.2 Mont Valin

Le mont Valin est un autre site où ont été installés des instruments de mesure pour le givrage atmosphérique, car ce phénomène y est très fréquent. Ce site, qu'il est possible de voir sur la figure 5.4, se situe au nord de Bagotville. Le mont s'élève jusqu'à 902 m au-dessus du niveau de la mer (McComber *et al.*, 1995). Les mesures de givrage y sont effectuées grâce à un givromètre d'Hydro-Québec, ainsi qu'avec des jauges installées sur des segments de câbles électriques (McComber *et al.*, 1995). Trois publications indiquent les heures de givrage mesurées à ce site pour trois hivers différents. McComber *et al.* (1995) écrit qu'il y a eu 370 h de conditions givrantes à l'hiver 1991-92 (62 h de précipitations givrantes et 308 h de givrage en nuages), Druez et McComber (1996) en ont observé 802 à l'hiver 1992-93 (99 h de précipitations givrantes et 702 h de givrage en nuages), et finalement, à l'hiver 1995-96, il y aurait eu 927 heures de givrage atmosphérique (450 h de précipitations givrantes et 477 h de givrage en nuages) (Druez *et al.*, 1999). La figure 5.5 illustre l'évolution saisonnière de givrage atmosphérique prédite par le modèle pour ce site. Le modèle utilisé prédit bien peu d'heures de givrage atmosphérique par rapport aux observations effectuées *in situ*. Même en prenant la valeur maximale de l'intervalle de prédiction, une importante sous-estimation demeure. Sur la carte de la figure 5.4, le mont Valin se situe dans une zone où il y a, en moyenne, entre 71 et 80 h de givrage atmosphérique annuellement.



**Figure 5.5** Prédiction des heures saisonnières de givrage atmosphérique pour le mont Valin.

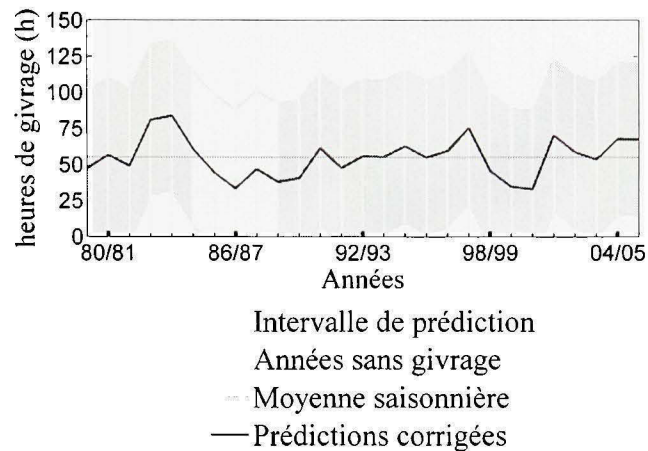
Tout en se rappelant que le mont Valin est un site exceptionnel en ce qui concerne le givrage atmosphérique, son exemple illustre clairement les limites du modèle développé ici. Toutefois, il est probable que la résolution du modèle puisse partiellement expliquer pourquoi les



prédictions sont si différentes des observations. Trois des quatre points de maille les plus près du Mont-Valin sont à des élévations par rapport au niveau de la mer de 227 m, et le quatrième est à 487 m au dessus du niveau de la mer. Ainsi, il y a une différence très importante entre l'élévation modélisée et l'élévation réelle du mont (902 m). Or, cette différence d'élévation peut réduire le nombre d'heures de givrage atmosphérique prédit de deux manières. Premièrement, plus un point est élevé, plus les températures sont généralement basses, donc plus souvent les conditions de température et d'humidité relative imposées peuvent être satisfaites. Il pourrait donc y avoir une sous-estimation due à la faible élévation des points du modèle de la RRAN. Deuxièmement, le givrage atmosphérique peut être causé par des montées orographiques et en ne modélisant pas assez précisément les variations de terrain, le givrage atmosphérique dû aux montées orographiques ne peut pas non plus l'être. Tel qu'il l'a été démontré par Nygaard *et al.* (2007), afin de prédire de manière exacte les occurrences de nuages et brouillards givrants dues aux montées orographiques, il est nécessaire d'avoir un modèle avec une résolution horizontale très fine.

### 5.2.2.3 New Richmond

À New Richmond, Farzaneh *et al.* (2001) ont remarqué qu'il y a eu cinq saisons sans givrage atmosphérique. À cet endroit, les mesures de givrage sont faites avec un glacimètre d'Hydro-Québec, un détecteur de glace passif. Ces cinq saisons sans givrage atmosphérique sont les hivers de 1984-85 à 1988-89. Elles ont été suivies de sept saisons avec 17 événements de givrage atmosphérique chacune (les auteurs ne mentionnent toutefois pas combien d'heures cela représente). Comme pour Murdochville et le mont Valin, le climat givrant de New Richmond est estimé en interpolant des quatre points de maille les plus près de cette ville. L'évolution des heures de givrage atmosphérique par saison est illustrée à la figure 5.6. Bien que quatre des cinq saisons sans givrage atmosphérique indiquent un nombre d'heures sous la moyenne prédite, le modèle surestime quand même le givrage atmosphérique pour cette période de cinq ans. À l'inverse de la situation décrite pour le mont Valin, à New Richmond les points de maille de la RRAN qui modélisent le climat de la ville se situent plus haut (à 227 m et 63 m au dessus du niveau de la mer) que l'élévation réelle de la ville (8 m). Cela peut donc influencer le nombre d'heures prédit. Mais dans ce cas-ci, les observations se situent malgré tout à l'intérieur de l'intervalle de prédiction pour quatre des cinq saisons, où cet intervalle débute à zéro. Finalement, il n'est pas possible de savoir si, malgré cette surestimation, la moyenne annuelle prédite est bonne ou non puisque cette information n'est pas donnée par Farzaneh *et al.* (2001).

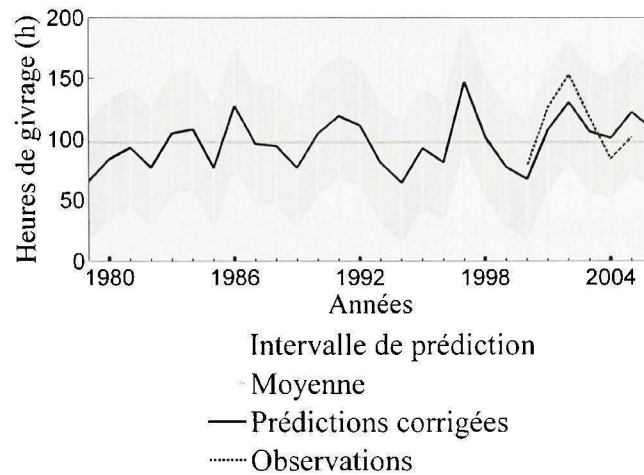


**Figure 5.6** *Prédiction des heures saisonnières de givrage atmosphérique pour New Richmond.*

#### 5.2.2.4 Mirabel

En dernier lieu, il est intéressant de se pencher sur le cas de Mirabel. Cet aéroport est l'un des six sites utilisés pour la validation. Il est mentionné ici, car c'est un endroit reconnu pour la fréquence de précipitations givrantes (Isaac *et al.*, 2001), avec une moyenne de 70 h de précipitation givrantes par an. Ce chiffre est issu d'une analyse climatologique sur une période de 30 ans (Isaac *et al.*, 2001). Dans la figure 5.4, cet aéroport est aussi situé dans une zone de givrage atmosphérique importante. D'après les six ans de données disponibles, il est estimé que les précipitations givrantes représentent 87 % des événements givrants totaux. Ainsi, la moyenne annuelle de 97 h calculée par le modèle de température et d'humidité relative semble être une prédiction peut-être un peu élevée, mais acceptable. La figure 5.7 illustre l'évolution annuelle du nombre d'heures de givrage atmosphérique prédit.

Il est aussi bien connu que Mirabel a été frappé par la tempête de verglas de 1998. Cet événement de verglas exceptionnel a duré du 4 janvier au 10 janvier 1998 (Milton et Bourque, 1999). Au sud de Mirabel, l'aéroport de St-Hubert a enregistré 70 h de givrage pour cette tempête uniquement (Milton et Bourque, 1999). Toutefois, l'année 1998 ne ressort pas, dans la figure 5.7, comme ayant été une année hors de l'ordinaire. En effet, le nombre d'heures pour cette année est pratiquement égal à la moyenne de 97 h. Sans connaître le nombre d'heures total de givrage atmosphérique à Mirabel (précipitation et brouillards givrants combinés), il n'est pas possible de savoir si la prédiction émise est correcte ou non pour cette année en particulier.



**Figure 5.7** *Prédiction des heures saisonnières de givrage atmosphérique pour Mirabel.*

### 5.3 Bilan

Pour le domaine de l'éolien, il est utile de savoir quels sites sont les plus sujets au givrage atmosphérique et quels sites le sont moins, en plus de savoir pendant combien de temps, en moyenne, sévissent des conditions de givrage atmosphérique. Suite à l'analyse de différents modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique, ce chapitre en a développé un davantage pour tracer une première carte de givrage atmosphérique pour le sud du Québec.

Il semble que, dans le cas où aucune autre donnée sur le givrage atmosphérique ne soit disponible, la carte présentée ici soit en mesure de fournir une estimation qui peut avoir une certaine valeur. De plus, l'intervalle de prédiction, même s'il est grand, permet de voir quelle peut être l'erreur associée à la prédiction indiquée par la carte. Là où il y a peu ou pas du tout d'information, il serait par exemple possible de faire l'hypothèse qu'il n'y aura pas plus d'heures de givrage atmosphérique que ce qu'indique la borne supérieure de l'intervalle de prédiction. Suite aux résultats des comparaisons avec des sites autres que les sites de validation, il serait utile de vérifier si les données numériques sont à la même élévation à partir du niveau de la mer que l'élévation réelle du site considéré. Finalement, si des données sont disponibles pour un site, il est important de vérifier si ces données décrivent la durée des événements de givrage atmosphérique ou la durée *et* la persistance des événements. La période de persistance du givrage atmosphérique peut durer plus longtemps que la période d'accrétion. Conséquemment, ces deux durées de différentes natures (la durée de l'accrétion versus la durée de l'accrétion *et* de la persistance), ne devraient pas être comparées entre elles.



## CONCLUSION

### Résumé

Les éoliennes en climat froid sont soumises à de basses températures et à des événements de givrage atmosphérique. Ce sont deux phénomènes qui peuvent avoir des effets sur le fonctionnement de l'éolienne, la durée de vie de ses composantes, et la puissance générée. Le présent mémoire s'est concentré sur un seul de ces phénomènes, soit le givrage atmosphérique.

Avant l'installation d'un parc éolien, il est utile de connaître la fréquence à laquelle se produit du givrage atmosphérique, le type de givrage atmosphérique, l'intensité d'accrétion et la persistance des événements. Différents types de givrage atmosphérique peuvent avoir une influence sur les parcs éoliens, en particulier les précipitations givrantes et le givrage en nuage. Néanmoins, il n'est pas facile d'obtenir toutes ces informations.

Dans un premier temps, plusieurs auteurs affirment qu'il n'existe pas de détecteur de givrage atmosphérique entièrement fiable. Ainsi, la mesure même du phénomène demeure un problème. Il existe plusieurs instruments de mesure et méthodes de mesure indirectes qui permettent de détecter le givrage atmosphérique et d'en estimer les différentes caractéristiques. Certains instruments sont passifs, donc doivent être vérifiés manuellement, alors que d'autres peuvent être reliés à des systèmes d'acquisition de données. Il existe des instruments qui détectent le givrage atmosphérique directement et il existe des méthodes de détection indirectes qui, à l'aide de deux ou plus de deux instruments de mesure, permettent d'estimer les périodes et les caractéristiques du givrage atmosphérique. Toutefois, lorsque comparés entre eux, les différents instruments de mesure et les différentes techniques ne donnent pas les mêmes résultats. De plus, un seul instrument ou une seule technique ne peut pas apporter de l'information sur toutes les caractéristiques du givrage atmosphérique qu'il serait souhaitable de connaître.

Dans un deuxième temps, le givrage atmosphérique est un phénomène si variable dans le temps et dans l'espace que l'analyse des données de courte durée ou à une trop longue distance du site à l'étude peut mener à des erreurs d'estimation importantes. Pour la durée des mesures, la norme ISO 12494 recommande d'analyser entre quelques années à quelques décennies de données, en fonction du site. L'OMM, quant à elle, recommande l'analyse de 30 ans de données pour tout calcul de moyennes ou d'extrêmes. Il va de soi qu'il n'est pas possible d'effectuer des campagnes de mesure d'une telle envergure préalablement à l'installation d'un parc éolien. Toutefois, les aéroports et des stations de mesure passives d'Hydro-Québec mesurent

depuis longtemps le givrage atmosphérique au Québec. Lorsqu'il est possible d'avoir accès à ces données et lorsque les stations de mesure sont à proximité du site étudié, elles peuvent être d'une grande utilité.

La variabilité spatiale des phénomènes de givrage atmosphérique complique aussi la collecte de données ou d'informations. Le givrage atmosphérique est un phénomène qui peut être très localisé et dont la fréquence peut être influencée par la proximité d'étendues d'eau et par l'orographie. Un nuage givrant, par exemple, peut s'accrocher à un sommet alors que des conditions atmosphériques tout autres prévalent autour de ce sommet. Ainsi, si le climat givrant d'un site est connu, il n'est pas nécessairement vrai que d'autres sites à proximité auront les mêmes caractéristiques givrantes. C'est pourquoi les données d'aéroports et les données d'Hydro-Québec ont une applicabilité limitée pour des sites éloignés des stations de mesure.

Par conséquent, et afin d'obtenir des informations sur le givrage atmosphérique à des sites éloignés, plusieurs auteurs ont étudié la possibilité de modéliser le givrage atmosphérique à partir de données météorologiques standard, des données qui ont généralement une meilleure résolution spatiale que des données sur le givrage atmosphérique. Ces modèles font par exemple appel aux paramètres de température et d'humidité relative, ou à la hauteur des nuages, aux données de précipitations et autres. Toutefois, la performance de ces modèles n'est pas toujours bien connue.

Finalement, il est important de rappeler qu'il existe des atlas qui décrivent la répartition spatiale des heures moyennes annuelles ou du nombre d'événements annuel moyen de précipitations givrantes. Toutefois, il n'existe pas d'équivalent public pour le givrage en nuage, qui est aussi d'intérêt pour le domaine de l'éolien. Pour toutes ces raisons, la caractérisation du climat givrant d'un site éolien demeure problématique et la recherche présentée dans ce mémoire a tenté d'apporter certains éléments de réponse à cette problématique à travers les initiatives résumées ci-dessous.

## **Banc d'essai**

La première contribution au domaine est la conception d'un banc d'essai pour le givrage atmosphérique. Afin d'étudier de manière plus approfondie plusieurs instruments et techniques de mesure de ce phénomène, un banc d'essai a été monté à Baie-des-Sables en Gaspésie. Celui-ci permet d'estimer la durée des événements de givrage atmosphérique à l'aide d'un

détecteur de glace automatisé, d'un détecteur de glace passif, d'un appareil photo numérique, et avec la méthode de température et d'humidité relative, la méthode de température, d'humidité relative et radiation solaire, et finalement, la méthode de température et de précipitation. Le banc d'essai permet aussi d'estimer la persistance des événements grâce à la méthode des écarts-types, la méthode utilisant un anémomètre chauffé et un anémomètre non chauffé, avec l'appareil photo et avec le détecteur de glace passif. Il est possible d'estimer l'intensité d'accrétion grâce aux deux détecteurs de glace, l'instrument automatisé et l'instrument passif, avec le pluviomètre lors de précipitations et à l'aide des photos de l'appareil photo. Finalement, il est possible de savoir quel type de givrage atmosphérique a lieu grâce au détecteur passif, à l'appareil photo et au pluviomètre.

La performance des différents instruments et des différentes méthodes pourra être analysée avec la méthodologie d'évaluation des modèles de prédiction des événements de givrage atmosphérique développée au chapitre 3.

### **Méthodologie d'évaluation des modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique**

Dans la littérature, différents auteurs utilisent et évaluent divers modèles de prédictions de périodes de givrage atmosphérique. Leurs évaluations ou validations sont fonction, entre autres, des objectifs des recherches et des données à leur disposition. Parfois, l'évaluation des modèles est décrite de manière qualitative et d'autres fois les résultats des modèles ne sont validés que lors d'événements de givrage atmosphérique connus, sans vérifier si les modèles prédisent ou non du givrage atmosphérique lorsque ce phénomène n'est pas observé. Ainsi, le chapitre 3 du mémoire a proposé une méthodologie d'évaluation des modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique quantitative.

La méthodologie développée calcule plusieurs indices de performance. Deux indices évaluent le nombre d'heures de givrage atmosphérique prédit par rapport au nombre d'heures observé annuellement. Trois indices permettent de voir si les événements prédits ont lieu au même moment que les événements observés. Et finalement, un dernier indice donne une indication de l'erreur que peut introduire la modélisation du givrage atmosphérique dans l'estimation de la production d'énergie annuelle des éoliennes. Les deux indices considérés comme les plus importants sont le coefficient de détermination,  $R^2$ , qui indique s'il y a une corrélation entre le nombre d'heures annuelles de givrage atmosphérique prédit et observé, et le  $CSI$ , qui évaluent si les événements prédits et observés ont lieu au même moment. Ce dernier indice



de performance permet de tenir compte des fausses prédictions (des prédictions de givrage atmosphérique qui ne correspondent pas à des observations de givrage atmosphérique), et des observations manquées (des prédictions de non-givrage alors que des événements de givrage atmosphérique sont observés).

La méthodologie décrit aussi les traitements des données qui doit précéder l'analyse des modèles. Ces traitements ont par exemple permis de ramener les bases de données utilisées à une même échelle temporelle et spatiale. Les données utilisées sont des données de réanalyse de la RRAN pour l'application des modèles et des données de six aéroports et de six années pour la validation des modèles.

Finalement, la méthodologie propose également d'imposer des limites fixes au paramètre de température et d'imposer des limites variables aux autres paramètres météorologiques utilisés. Par exemple, dans le cas du modèle de prédictions de périodes de givrage atmosphérique utilisant la température et l'humidité relative comme paramètres, il est recommandé de faire varier la limite d'humidité relative imposée de plus grand ou égal à 90 %, jusqu'à plus grand ou égal à 100 %, par pas d'un pour cent.

### **Résultats des analyses de modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique**

En tout, neuf modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique ont été analysés avec la méthodologie proposée. Les cinq premiers modèles étaient les modèles de :

- température et humidité relative ( $T, HR$ ) ;
- température et hauteur de la base des nuages ( $T, HN$ ) ;
- température et visibilité ( $T, VIS$ ) ;
- température et teneur en eau liquide ( $T, TEL$ ) , et ;
- température et prédiction de pluie verglaçante ( $T, PVG$ ).

Les résultats ont montré que le modèle de température et d'humidité relative est celui qui permet d'obtenir la meilleure corrélation entre les heures de givrage atmosphériques annuelles prédites et observées ( $R^2 = 0.53$ ). Le modèle de température et de précision de pluie verglaçante est celui qui permet d'atteindre le  $\overline{CSI}$  le plus élevé ( $\overline{CSI} = 0.36$ ). Ce sont surtout les résultats du modèle de température et d'humidité relative qui sont sensibles à la limite d'humidité relative imposée. Les performances des autres modèles varient moins en fonction de la limite imposée au paramètre utilisé. Sauf pour les modèles de température et de teneur en eau

liquide et de température et de prédiction de précipitations givrantes, les résultats varient peu d'aéroport en aéroport.

Étant donné ces résultats, d'autres analyses ont été effectuées avec quatre autres modèles. Ceux-ci ont combiné le modèle de température et la prévision de pluie verglaçante avec l'un des quatre autres paramètres météorologiques utilisés précédemment (humidité relative, hauteur de la base des nuages, visibilité ou teneur en eau liquide). Les résultats n'ont apporté aucune amélioration.

Il a donc été conclu qu'avec les données et les modèles utilisés, il n'est pas possible d'obtenir de très bonnes prédictions des événements de givrage atmosphérique. Ceci peut être dû aux modèles eux-mêmes, qui sont peut-être trop simples pour modéliser un phénomène complexe comme le givrage atmosphérique. Les données, ceux de la RRAN et les données d'aéroports, peuvent aussi avoir une influence sur les résultats. Il existe une incertitude par rapport aux données d'aéroports à cause de l'instrument de mesure et du traitement de données du système AWOS. Pour les données de la RRAN, leur résolution a certainement une influence, et il est aussi possible que le modèle Eta qui est utilisé pour générer les données ait une influence.

### **Cartographie du givrage atmosphérique pour le sud du Québec**

Il a été question de tracer une carte du givrage atmosphérique préliminaire pour le domaine de l'éolien avec le modèle qui semble le plus adéquat. Dans le cadre de cette recherche, les heures moyennes annuelles de givrage atmosphérique ont été modélisées avec le modèle qui donne la meilleure corrélation entre les heures annuelles prédites et observées, soit le modèle de température et d'humidité relative pour une valeur de l'humidité relative plus grande ou égale à 92 %.

Ce modèle, tel qu'appliqué aux 28 ans de données de la RRAN, prédit un nombre d'heures de givrage atmosphérique beaucoup plus élevé que les heures observées. Cependant, à l'aide de l'équation de la régression linéaire, il est possible de corriger ces prédictions. Lorsqu'appliqué aux six ans et aux six aéroports de données, ce modèle et cette correction permettent de prédire des heures annuelles de givrage atmosphérique qui ressemblent aux heures annuelles observées. Toutefois, il y a beaucoup de dispersion des données autour de la régression linéaire. Afin d'être en mesure d'estimer la valeur de futures prédictions, il a été possible de tracer un intervalle de prédiction autour de la régression linéaire. Cet intervalle tient compte de la variabilité des futures prédictions autour de la moyenne des prédictions utilisées pour



tracer la régression linéaire. Cet intervalle est d'environ plus ou moins 50 h, ce qui est assez grand par rapport aux heures observées annuellement aux aéroports utilisés pour la validation (entre 33 et 153 h).

Avec le modèle de prédiction et de correction décrit, une carte illustrant les heures moyennes annuelles de givrage atmosphérique prédites a été tracée pour la partie sud du Québec. Étant donné les différentes zones écoclimatiques de la province du Québec, les résultats ne peuvent pas automatiquement être extrapolés à des zones écoclimatiques différentes de celles où la validation a été effectuée. La carte montre qu'il y a une zone de givrage atmosphérique fréquent dans la vallée du St-Laurent, entre Montréal et Québec, et aussi au nord de Chibougamau. Lorsque comparée aux cartes de précipitations givrantes existantes, elle indique généralement au moins autant, sinon plus d'heures moyennes annuelles de givrage atmosphérique. En supposant que les cartes existantes sont justes, il y aurait d'importantes zones où les brouillards et nuages givrants sont très fréquents. Même s'il est connu que le givrage en nuage peut être très fréquent sur des sommets de collines ou de montagnes, il n'est peut-être pas réaliste de penser que ce type de givrage peut être très fréquent sur de grandes zones.

Afin de se faire une idée de l'applicabilité de la carte présentée dans ce mémoire, il est question d'analyser quatre sites où le givrage est connu comme étant, ou ayant été pendant une certaine période, fréquent ou rare. Ces sites sont : Murdochville, le mont Valin, New Richmond et Mirabel.

Les prédictions pour deux saisons de données à Murdochville correspondent d'assez près à des observations effectuées au site. Pour le mont Valin, les prédictions du modèle sont de très importantes sous-estimations du nombre d'heures de givrage atmosphérique mesuré au sommet du mont, qui varie entre 370 et 927 h pour les trois saisons étudiées. Cette sous-estimation substantielle peut être, en partie, expliquée par le fait que l'élévation des points de maille utilisés pour la modélisation du climat givant au sommet du mont est à une altitude beaucoup plus basse que le sommet réel. Cela est une conséquence de la résolution du modèle utilisé pour générer les données de la RRAN. La sous-estimation pourrait aussi être la conséquence de la qualité des données ou de conditions particulières à ce site de givrage exceptionnel. À New Richmond, cinq saisons sans givrage ont été observées. Pour quatre de celles-ci, le modèle prévoit un nombre d'heures sous la moyenne annuelle, et l'intervalle de prédiction débute à zéro. Par conséquent, les observations pour quatre des cinq années se trouvent à l'intérieur de l'intervalle de prédiction. Toutefois, les prédictions sont des surestimations de la réalité.



Finalement, il a été décidé de voir plus en détail un des sites de validation, l'aéroport de Mirabel. Ce site est reconnu comme ayant un important nombre d'heures de précipitations givrantes, 70 h par an en moyenne. Dans la carte de givrage atmosphérique présentée, Mirabel se situe aussi dans une zone de givrage atmosphérique fréquent, mais avec en moyenne 97 h de givrage atmosphérique par an. Étant donné la fréquence des brouillards givrants à ce site pour les six années de données analysées il semble que les 27 heures supplémentaires puissent être attribuées à des heures de brouillards givrants. Toujours pour Mirabel, les prédictions pour l'année 1998 se situent près de la moyenne, toutefois cet aéroport a été frappé par l'événement exceptionnel de verglas de janvier de cette année. Néanmoins, sans connaître les heures de brouillards givrants pour cet aéroport à cette année, il n'est pas possible de savoir si le modèle de prédiction est en mesure de détecter cet événement exceptionnel ou non.

Ces quatre analyses supplémentaires permettent de mieux comprendre les limites du modèle et de se faire une idée de l'applicabilité du modèle à des stations autres que les stations de validation. Bon nombre des observations mentionnées se situent à l'intérieur de l'intervalle de prédiction calculé. Même si cet intervalle demeure grand, la carte peut fournir une estimation valable, surtout dans le cas où aucune autre donnée n'est disponible.

### **Publications et présentations**

Les autres réalisations de ce projet de maîtrise sont deux articles de comptes-rendus de conférence. Ceux-ci ont été mentionnés dans quelques-uns des chapitres. Le premier article a été publié dans les comptes-rendus du « 12<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures » (Comeau *et al.*, 2007) et s'intitule : « Prediction of icing events using NARR data ». Il décrit la méthodologie d'évaluation des modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique et présente quelques résultats. L'article a fait l'objet d'une présentation à ce congrès au mois d'octobre 2007.

Le deuxième article paraîtra dans les comptes-rendus de la « 18<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference » (Comeau *et al.*, 2008) et s'intitule : « Mapping Mean Annual Icing Hours for the Québec Wind Energy Industry ». Il reprend des éléments de la méthodologie d'évaluation des modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique, commente quelques résultats, et présente la carte du chapitre 5. Cet article fait aussi l'objet d'une présentation à la conférence au mois de juin 2008.

La méthodologie d'évaluation des modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique et certains résultats ont aussi été présentés au 23<sup>ième</sup> Congrès annuel et salon professionnel de l'Association canadienne de l'énergie éolienne au mois d'octobre 2007.

## RECOMMANDATIONS

Puisque les modèles de prédiction des périodes de givrage atmosphérique analysés démontrent certaines lacunes, il est recommandé de poursuivre les recherches avec des modèles plus complexes. Avec la méthodologie établie au chapitre 3, il sera possible de voir si des modèles plus poussés sont en mesure de mieux prédire les événements de givrage. Il serait par exemple possible :

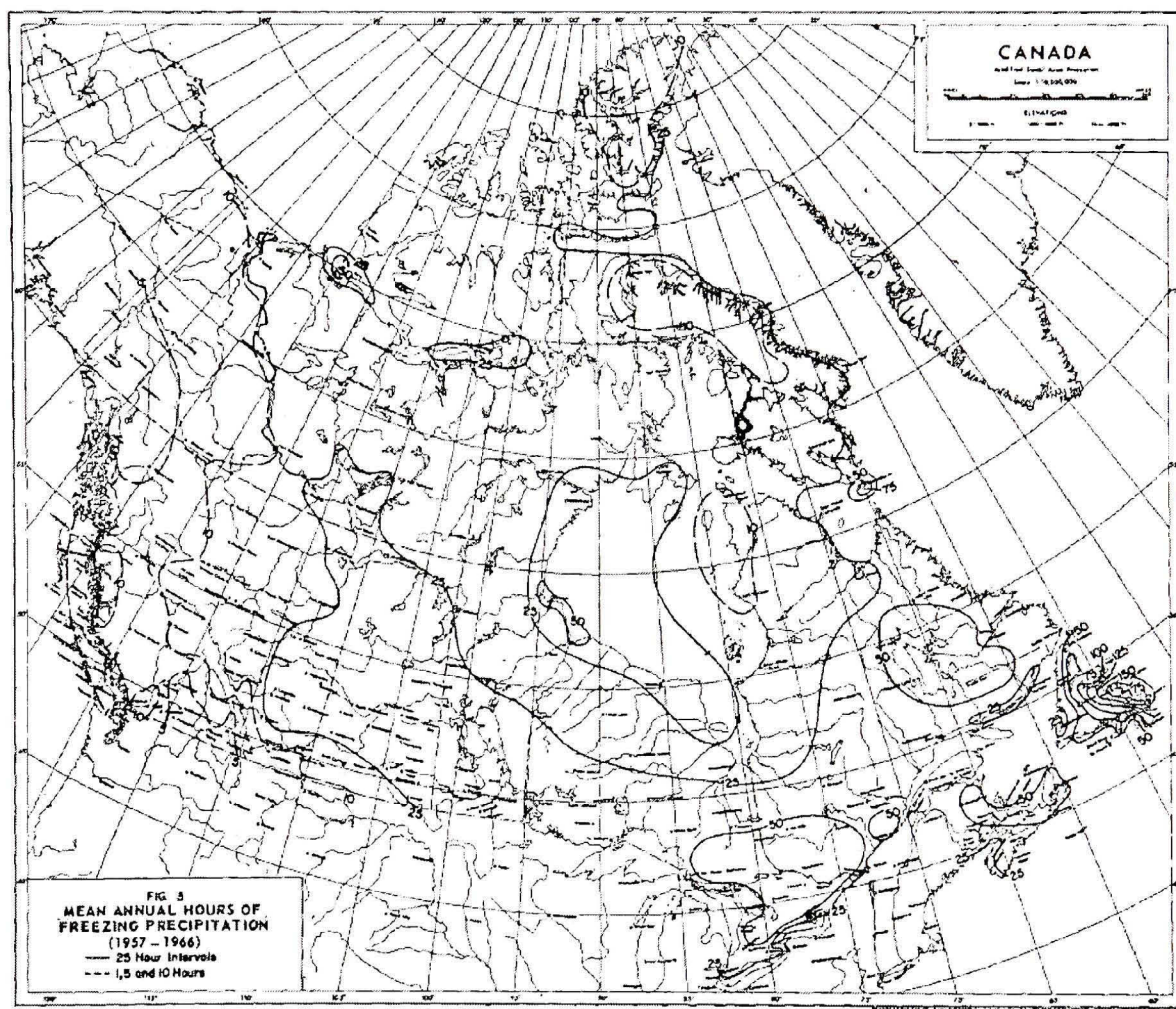
- d’effectuer des analyses avec différents paramètres météorologiques de la base de données de la RRAN (il y a par exemple des données sur la radiation solaire, sur la vitesse verticale, qui peut être intéressante pour détecter les montées orographiques, et sur les prévisions de différentes sortes de précipitations) ;
- d’analyser des algorithmes plus complexes basés sur la physique des accrétions, ou des méthodes statistiques comme des réseaux de neurones ;
- de tenir compte de la différence d’élévation entre les points de la RRAN et les aéroports en faisant une interpolation en trois dimensions, ou en ajustant les paramètres météorologiques en fonction de cette différence d’élévation ;
- d’intégrer des données topographiques de plus haute résolution afin de contourner partiellement le problème de la résolution spatiale horizontale des données de la RRAN, ou ;
- d’utiliser différentes données à plus haute résolution temporelle et/ou spatiale.

De plus, il est important que la recherche sur le givrage dans le domaine de l’éolien aille au-delà de la prévision des périodes de givrage atmosphérique. Il serait intéressant d’estimer la persistance des événements de givrage atmosphérique, de prédire le type d’accrétion et l’intensité d’accrétion - le tout dans le but de prédire les pertes de puissance et autres problèmes qui peuvent survenir à cause du givrage atmosphérique. Finalement, il serait aussi pertinent de valider une méthode d’extrapolation verticale des heures de givrage atmosphérique afin d’estimer les périodes de givrage atmosphérique au niveau du moyeu des éoliennes.



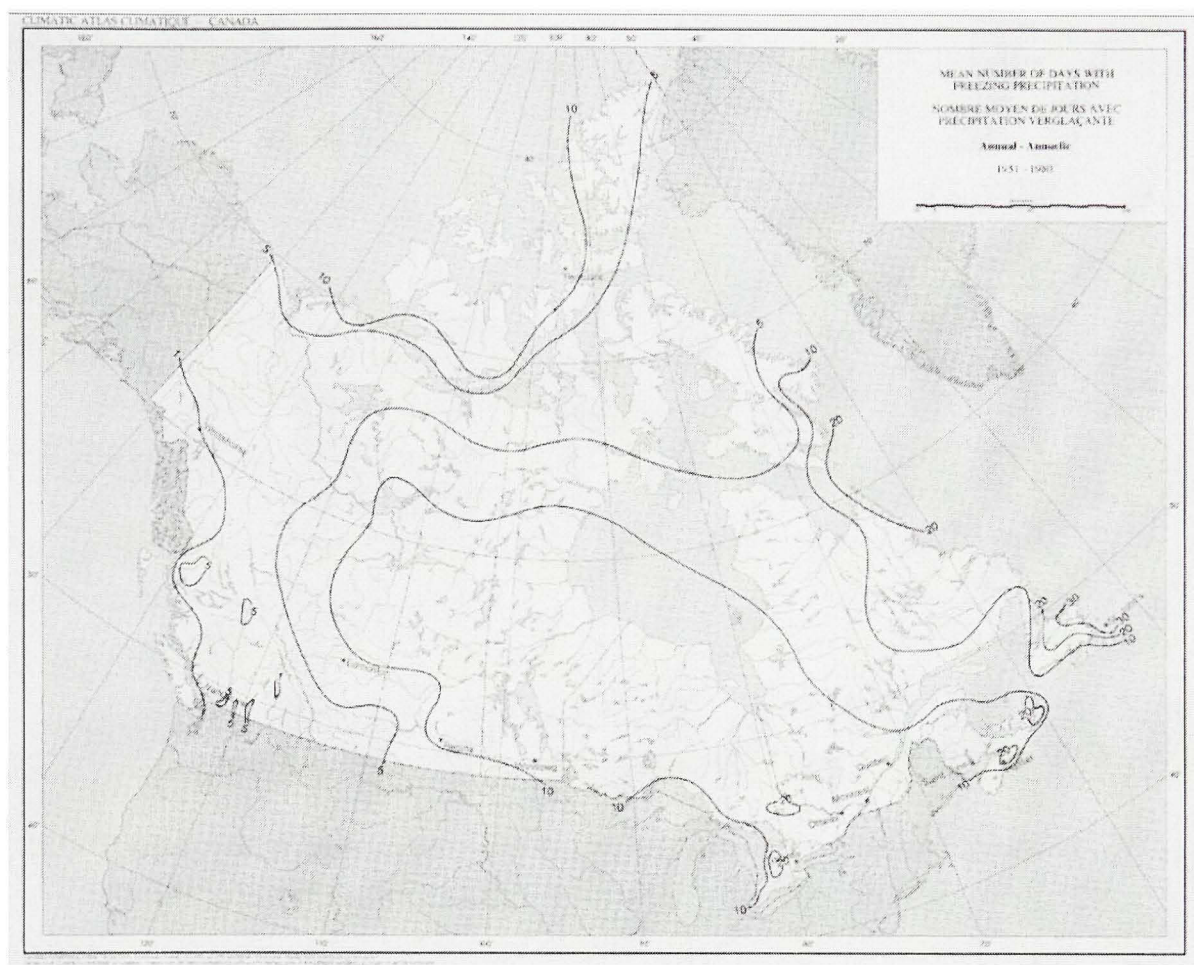
## ANNEXE I

### LES ATLAS DE GIVRAGE ATMOSPHÉRIQUE PUBLICS POUR LE CANADA OU LE QUÉBEC



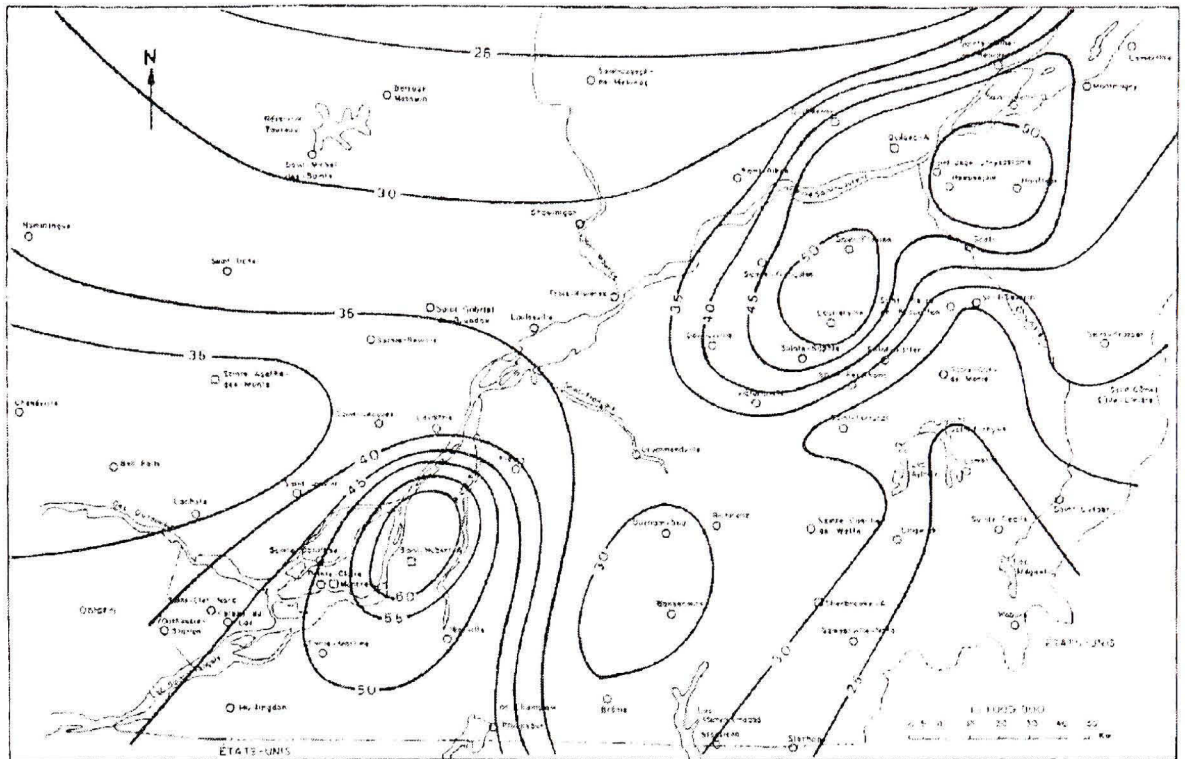
**Figure I.1** *Atlas des heures moyennes annuelles de précipitation givrantes (document original de mauvaise qualité).* (Tiré de McKay et Thomson, 1969)

Source : Cette figure est tirée de McKay et Thomson, 1969 « Estimating the Hazard of Ice Accretion in Canada from Climatological Data » et correspond à la « Fig. 3. Mean annual hours of freezing precipitation, 1957-66 » présentée en page 930 dans le document original.



**Figure I.2** *Atlas du nombre de jours annuel moyen d'événements de précipitations verglaçantes.* (Tiré de Environnement Canada, 1987)

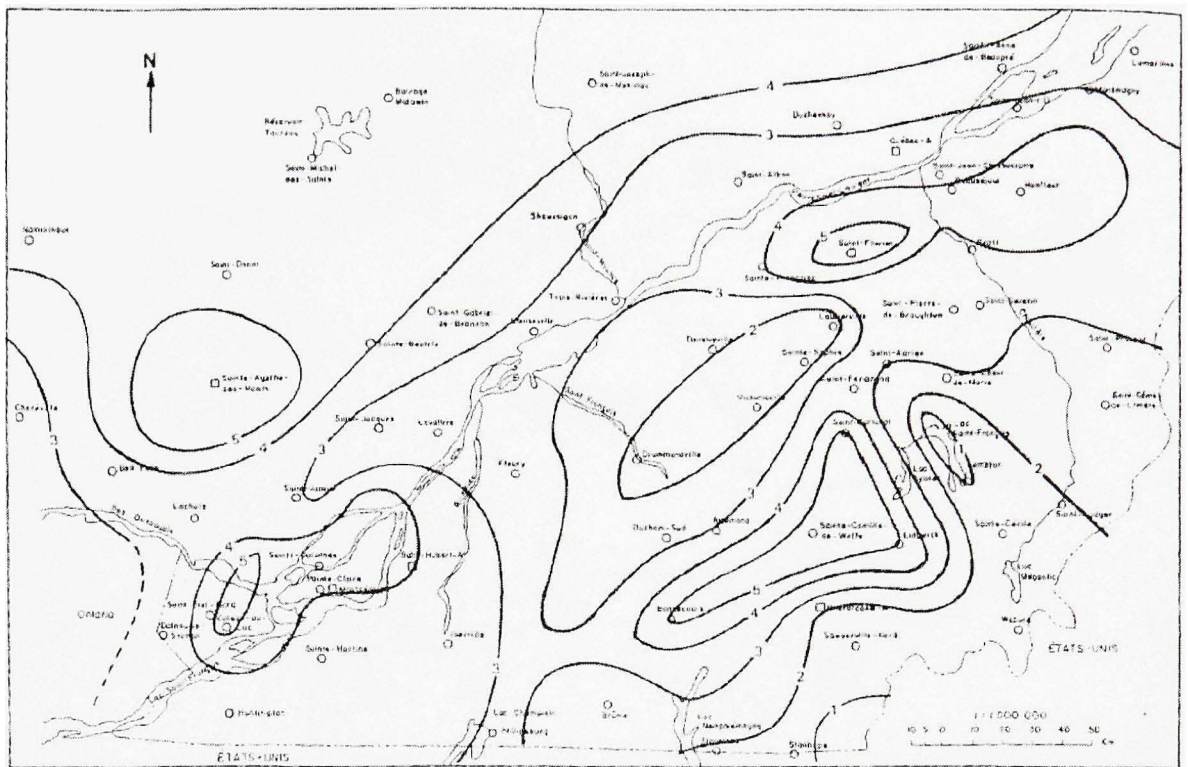
Source : Cette figure est tirée de Environnement Canada, 1987 « Atlas climatique du Canada, Série de cartes illustrant le climat du Canada » et correspond à la figure « Nombre moyen de jours avec précipitations verglaçantes » présentée en page 22 dans le document original.



**Figure I.3** *Atlas du nombre d'occurrences moyennes annuelles de pluies verglaçantes pour la vallée du St-Laurent.* (Tiré de Laflamme et Périard, 1996)

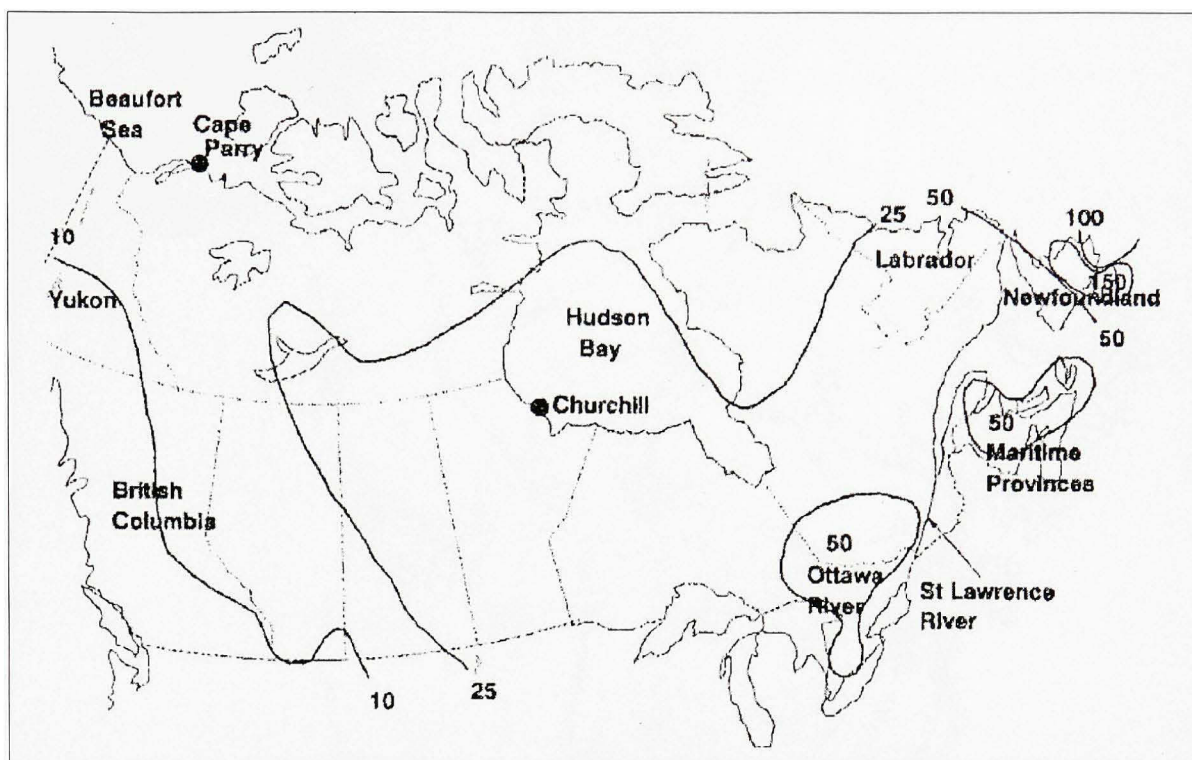
Source : Cette figure est tirée de Laflamme et Périard, 1996 « The Climate of Freezing Rain Over the Province of Québec in Canada : A Preliminary Analysis » et correspond à la « Fig. 3 : Mean annual frequency of freezing rain events (N/Year) in the St-Lawrence valley » présentée en page 21 dans le document original.





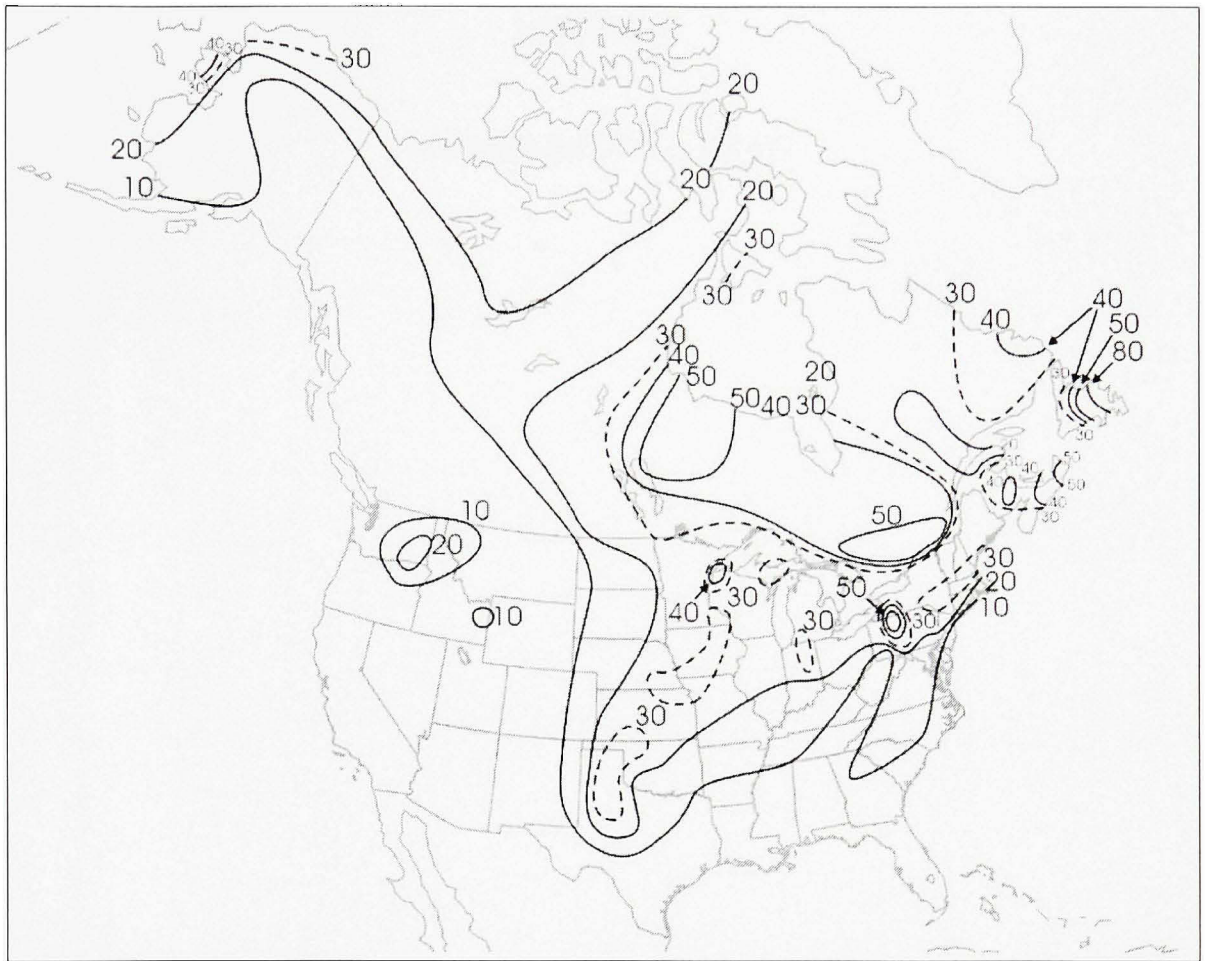
**Figure I.4** *Atlas de la persistance moyenne annuelle de verglas en jours pour la vallée du St-Laurent.* (Tiré de Laflamme et Périard, 1996)

Source : Cette figure est tirée de Laflamme et Périard, 1996 « The Climate of Freezing Rain Over the Province of Québec in Canada, A Preliminary Analysis » et correspond à la « Fig. 4 : Mean maximum annual persistence of ice (days) in the St-Lawrence valley » présentée en page 22 dans le document original.



**Figure I.5** *Atlas des heures moyennes annuelles de pluies et bruines verglaçantes.*  
(Tiré de Stuart et Isaac, 1999)

Source : Cette figure est tirée de Stuart et Isaac, 1999 « Freezing precipitation in Canada » et correspond à la « Fig. 2 Approximate contour locations for annual freezing precipitation hours » présentée en page 90 dans le document original.



**Figure I.6** *Atlas des heures moyennes annuelles de précipitation verglaçantes pour l'Amérique du Nord.* (Tiré de Cortinas Jr. et al., 2004)

Source : Cette figure est tirée de Cortinas Jr. et al., 2004 « An Analysis of Freezing Rain, Freezing Drizzle, and Ice Pellets across the United States and Canada : 1976-90 » et correspond à la « Fig. 5. Median annual hours of freezing rain and freezing drizzle combined from 1970 to 1990 » présentée en page 383 dans le document original.



## **ANNEXE II**

### **VARIABLES DE LA RRAN**

## List of Variables in NARR Files

<u>rec #</u>	<u>wqrib abbrev.</u>	<u>Name and unit</u>	<u>level/layer type</u>	<u>time</u>
MERGED A (merged_AWIP32.YYYYMMDDHH)				
1	MSLET	Mean sea level pressure (ETA model) [Pa]	MSL	anl
2	PRMSL	Pressure reduced to MSL [Pa]	MSL	anl
3	PRES *	Pressure [Pa]	hybrid lev 1	anl
4	HGT *	Geopotential height [gpm]	hybrid lev 1	anl
5	TMP *	Temp. [K]	hybrid lev 1	anl
6	POT *	Potential temp. [K]	hybrid lev 1	anl
7	RH *	Relative humidity [%]	hybrid lev 1	anl
8	SPFH *	Specific humidity [kg/kg]	hybrid lev 1	anl
9	MCONV *	Horizontal moisture divergence [kg/kg/s]	hybrid lev 1	anl
10	UGRD *	u wind [m/s]	hybrid lev 1	anl
11	VGRD *	v wind [m/s]	hybrid lev 1	anl
12	VVEL *	Pressure vertical velocity [Pa/s]	hybrid lev 1	anl
13	TKE *	Turbulent Kinetic Energy [J/kg]	hybrid lev 1	anl
14	VIS	Visibility [m]	sfc	anl
15	HPBL	Planetary boundary layer height [m]	sfc	anl
16	BMIXL	Blackadars mixing length scale [m]	hybrid lev 1	anl
17	HGT	Geopotential height [gpm]	100 mb	anl
18	TMP	Temp. [K]	100 mb	anl
19	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	100 mb	anl
20	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	100 mb	anl
21	UGRD	u wind [m/s]	100 mb	anl
22	VGRD	v wind [m/s]	100 mb	anl
23	CLWMR	Cloud water [kg/kg]	100 mb	anl
24	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	100 mb	anl
25	HGT	Geopotential height [gpm]	125 mb	anl
26	TMP	Temp. [K]	125 mb	anl
27	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	125 mb	anl
28	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	125 mb	anl
29	UGRD	u wind [m/s]	125 mb	anl
30	VGRD	v wind [m/s]	125 mb	anl
31	CLWMR	Cloud water [kg/kg]	125 mb	anl
32	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	125 mb	anl
33	HGT	Geopotential height [gpm]	150 mb	anl
34	TMP	Temp. [K]	150 mb	anl
35	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	150 mb	anl
36	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	150 mb	anl
37	UGRD	u wind [m/s]	150 mb	anl
38	VGRD	v wind [m/s]	150 mb	anl
39	CLWMR	Cloud water [kg/kg]	150 mb	anl
40	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	150 mb	anl
41	HGT	Geopotential height [gpm]	175 mb	anl
42	TMP	Temp. [K]	175 mb	anl
43	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	175 mb	anl
44	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	175 mb	anl
45	UGRD	u wind [m/s]	175 mb	anl
46	VGRD	v wind [m/s]	175 mb	anl
47	CLWMR	Cloud water [kg/kg]	175 mb	anl
48	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	175 mb	anl
49	HGT	Geopotential height [gpm]	200 mb	anl
50	TMP	Temp. [K]	200 mb	anl
51	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	200 mb	anl

<u>rec #</u>	<u>wgrib abbrev.</u>	<u>Name and unit</u>	<u>level/layer type</u>	<u>time</u>
52	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	200 mb	anl
53	UGRD	u wind [m/s]	200 mb	anl
54	VGRD	v wind [m/s]	200 mb	anl
55	CLWXR	Cloud water [kg/kg]	200 mb	anl
56	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	200 mb	anl
57	HGT	Geopotential height [gpm]	225 mb	anl
58	TMP	Temp. [K]	225 mb	anl
59	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	225 mb	anl
60	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	225 mb	anl
61	UGRD	u wind [m/s]	225 mb	anl
62	VGRD	v wind [m/s]	225 mb	anl
63	CLWXR	Cloud water [kg/kg]	225 mb	anl
64	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	225 mb	anl
65	HGT	Geopotential height [gpm]	250 mb	anl
66	TMP	Temp. [K]	250 mb	anl
67	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	250 mb	anl
68	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	250 mb	anl
69	UGRD	u wind [m/s]	250 mb	anl
70	VGRD	v wind [m/s]	250 mb	anl
71	CLWXR	Cloud water [kg/kg]	250 mb	anl
72	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	250 mb	anl
73	HGT	Geopotential height [gpm]	275 mb	anl
74	TMP	Temp. [K]	275 mb	anl
75	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	275 mb	anl
76	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	275 mb	anl
77	UGRD	u wind [m/s]	275 mb	anl
78	VGRD	v wind [m/s]	275 mb	anl
79	CLWXR	Cloud water [kg/kg]	275 mb	anl
80	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	275 mb	anl
81	HGT	Geopotential height [gpm]	300 mb	anl
82	TMP	Temp. [K]	300 mb	anl
83	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	300 mb	anl
84	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	300 mb	anl
85	UGRD	u wind [m/s]	300 mb	anl
86	VGRD	v wind [m/s]	300 mb	anl
87	CLWXR	Cloud water [kg/kg]	300 mb	anl
88	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	300 mb	anl
89	HGT	Geopotential height [gpm]	350 mb	anl
90	TMP	Temp. [K]	350 mb	anl
91	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	350 mb	anl
92	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	350 mb	anl
93	UGRD	u wind [m/s]	350 mb	anl
94	VGRD	v wind [m/s]	350 mb	anl
95	CLWXR	Cloud water [kg/kg]	350 mb	anl
96	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	350 mb	anl
97	HGT	Geopotential height [gpm]	400 mb	anl
98	TMP	Temp. [K]	400 mb	anl
99	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	400 mb	anl
100	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	400 mb	anl
101	UGRD	u wind [m/s]	400 mb	anl
102	VGRD	v wind [m/s]	400 mb	anl
103	CLWXR	Cloud water [kg/kg]	400 mb	anl
104	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	400 mb	anl
105	HGT	Geopotential height [gpm]	450 mb	anl
106	TMP	Temp. [K]	450 mb	anl
107	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	450 mb	anl
108	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	450 mb	anl



<u>rec #</u>	<u>wqrib</u> <u>abbrev.</u>	<u>Name and unit</u>	<u>level/layer type</u>	<u>time</u>
109	UGRD	u wind [m/s]	450 mb	anl
110	VGRD	v wind [m/s]	450 mb	anl
111	CLWMR	Cloud water [kg/kg]	450 mb	anl
112	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	450 mb	anl
113	HGT	Geopotential height [gpm]	500 mb	anl
114	TMP	Temp. [K]	500 mb	anl
115	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	500 mb	anl
116	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	500 mb	anl
117	UGRD	u wind [m/s]	500 mb	anl
118	VGRD	v wind [m/s]	500 mb	anl
119	CLWMR	Cloud water [kg/kg]	500 mb	anl
120	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	500 mb	anl
121	HGT	Geopotential height [gpm]	550 mb	anl
122	TMP	Temp. [K]	550 mb	anl
123	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	550 mb	anl
124	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	550 mb	anl
125	UGRD	u wind [m/s]	550 mb	anl
126	VGRD	v wind [m/s]	550 mb	anl
127	CLWMR	Cloud water [kg/kg]	550 mb	anl
128	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	550 mb	anl
129	HGT	Geopotential height [gpm]	600 mb	anl
130	TMP	Temp. [K]	600 mb	anl
131	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	600 mb	anl
132	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	600 mb	anl
133	UGRD	u wind [m/s]	600 mb	anl
134	VGRD	v wind [m/s]	600 mb	anl
135	TKE	Turbulent Kinetic Energy [J/kg]	600 mb	anl
136	CLWMR	Cloud water [kg/kg]	600 mb	anl
137	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	600 mb	anl
138	HGT	Geopotential height [gpm]	650 mb	anl
139	TMP	Temp. [K]	650 mb	anl
140	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	650 mb	anl
141	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	650 mb	anl
142	UGRD	u wind [m/s]	650 mb	anl
143	VGRD	v wind [m/s]	650 mb	anl
144	TKE	Turbulent Kinetic Energy [J/kg]	650 mb	anl
145	CLWMR	Cloud water [kg/kg]	650 mb	anl
146	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	650 mb	anl
147	HGT	Geopotential height [gpm]	700 mb	anl
148	TMP	Temp. [K]	700 mb	anl
149	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	700 mb	anl
150	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	700 mb	anl
151	UGRD	u wind [m/s]	700 mb	anl
152	VGRD	v wind [m/s]	700 mb	anl
153	TKE	Turbulent Kinetic Energy [J/kg]	700 mb	anl
154	CLWMR	Cloud water [kg/kg]	700 mb	anl
155	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	700 mb	anl
156	HGT	Geopotential height [gpm]	725 mb	anl
157	TMP	Temp. [K]	725 mb	anl
158	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	725 mb	anl
159	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	725 mb	anl
160	UGRD	u wind [m/s]	725 mb	anl
161	VGRD	v wind [m/s]	725 mb	anl
162	TKE	Turbulent Kinetic Energy [J/kg]	725 mb	anl
163	CLWMR	Cloud water [kg/kg]	725 mb	anl
164	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	725 mb	anl
165	HGT	Geopotential height [gpm]	750 mb	anl

<u>rec #</u>	<u>wqrib</u> <u>abbrev.</u>	<u>Name and unit</u>	<u>level/layer type</u>	<u>time</u>
166	TMP	Temp. [K]	750 mb	anl
167	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	750 mb	anl
168	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	750 mb	anl
169	UGRD	u wind [m/s]	750 mb	anl
170	VGRD	v wind [m/s]	750 mb	anl
171	TKE	Turbulent Kinetic Energy [J/kg]	750 mb	anl
172	CLWWR	Cloud water [kg/kg]	750 mb	anl
173	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	750 mb	anl
174	HGT	Geopotential height [gpm]	775 mb	anl
175	TMP	Temp. [K]	775 mb	anl
176	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	775 mb	anl
177	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	775 mb	anl
178	UGRD	u wind [m/s]	775 mb	anl
179	VGRD	v wind [m/s]	775 mb	anl
180	TKE	Turbulent Kinetic Energy [J/kg]	775 mb	anl
181	CLWWR	Cloud water [kg/kg]	775 mb	anl
182	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	775 mb	anl
183	HGT	Geopotential height [gpm]	800 mb	anl
184	TMP	Temp. [K]	800 mb	anl
185	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	800 mb	anl
186	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	800 mb	anl
187	UGRD	u wind [m/s]	800 mb	anl
188	VGRD	v wind [m/s]	800 mb	anl
189	TKE	Turbulent Kinetic Energy [J/kg]	800 mb	anl
190	CLWWR	Cloud water [kg/kg]	800 mb	anl
191	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	800 mb	anl
192	HGT	Geopotential height [gpm]	825 mb	anl
193	TMP	Temp. [K]	825 mb	anl
194	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	825 mb	anl
195	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	825 mb	anl
196	UGRD	u wind [m/s]	825 mb	anl
197	VGRD	v wind [m/s]	825 mb	anl
198	TKE	Turbulent Kinetic Energy [J/kg]	825 mb	anl
199	CLWWR	Cloud water [kg/kg]	825 mb	anl
200	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	825 mb	anl
201	HGT	Geopotential height [gpm]	850 mb	anl
202	TMP	Temp. [K]	850 mb	anl
203	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	850 mb	anl
204	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	850 mb	anl
205	MCONV	Horizontal moisture divergence [kg/kg/s]	850 mb	anl
206	UGRD	u wind [m/s]	850 mb	anl
207	VGRD	v wind [m/s]	850 mb	anl
208	TKE	Turbulent Kinetic Energy [J/kg]	850 mb	anl
209	CLWWR	Cloud water [kg/kg]	850 mb	anl
210	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	850 mb	anl
211	HGT	Geopotential height [gpm]	875 mb	anl
212	TMP	Temp. [K]	875 mb	anl
213	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	875 mb	anl
214	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	875 mb	anl
215	UGRD	u wind [m/s]	875 mb	anl
216	VGRD	v wind [m/s]	875 mb	anl
217	TKE	Turbulent Kinetic Energy [J/kg]	875 mb	anl
218	CLWWR	Cloud water [kg/kg]	875 mb	anl
219	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	875 mb	anl
220	HGT	Geopotential height [gpm]	900 mb	anl
221	TMP	Temp. [K]	900 mb	anl
222	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	900 mb	anl

<u>rec #</u>	<u>wqrib</u> <u>abbrev.</u>	<u>Name and unit</u>	<u>level/lower type</u>	<u>time</u>
223	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	900 mb	anl
224	UGRD	u wind [m/s]	900 mb	anl
225	VGRD	v wind [m/s]	900 mb	anl
226	TKE	Turbulent Kinetic Energy [J/kg]	900 mb	anl
227	CLWXR	Cloud water [kg/kg]	900 mb	anl
228	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	900 mb	anl
229	HGT	Geopotential height [gpm]	925 mb	anl
230	TMP	Temp. [K]	925 mb	anl
231	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	925 mb	anl
232	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	925 mb	anl
233	UGRD	u wind [m/s]	925 mb	anl
234	VGRD	v wind [m/s]	925 mb	anl
235	TKE	Turbulent Kinetic Energy [J/kg]	925 mb	anl
236	CLWXR	Cloud water [kg/kg]	925 mb	anl
237	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	925 mb	anl
238	HGT	Geopotential height [gpm]	950 mb	anl
239	TMP	Temp. [K]	950 mb	anl
240	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	950 mb	anl
241	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	950 mb	anl
242	UGRD	u wind [m/s]	950 mb	anl
243	VGRD	v wind [m/s]	950 mb	anl
244	TKE	Turbulent Kinetic Energy [J/kg]	950 mb	anl
245	CLWXR	Cloud water [kg/kg]	950 mb	anl
246	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	950 mb	anl
247	HGT	Geopotential height [gpm]	975 mb	anl
248	TMP	Temp. [K]	975 mb	anl
249	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	975 mb	anl
250	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	975 mb	anl
251	UGRD	u wind [m/s]	975 mb	anl
252	VGRD	v wind [m/s]	975 mb	anl
253	TKE	Turbulent Kinetic Energy [J/kg]	975 mb	anl
254	CLWXR	Cloud water [kg/kg]	975 mb	anl
255	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	975 mb	anl
256	HGT	Geopotential height [gpm]	1000 mb	anl
257	TMP	Temp. [K]	1000 mb	anl
258	SPFH	Specific humidity [kg/kg]	1000 mb	anl
259	VVEL	Pressure vertical velocity [Pa/s]	1000 mb	anl
260	UGRD	u wind [m/s]	1000 mb	anl
261	VGRD	v wind [m/s]	1000 mb	anl
262	TKE	Turbulent Kinetic Energy [J/kg]	1000 mb	anl
263	CLWXR	Cloud water [kg/kg]	1000 mb	anl
264	ICMR	Ice mixing ratio [kg/kg]	1000 mb	anl
265	PRES	Pressure [Pa]	sfc	anl
266	PRESN *	Pressure (nearest grid point) [Pa]	sfc	anl
267	TMP *	Temp. [K]	sfc	anl
268	POT *	Potential temp. [K]	sfc	anl
269	TSOIL *	Soil temp. [K]	0-10 cm down	anl
270	SOILW *	Volumetric soil moisture (frozen + liquid) [fraction]	0-10 cm down	anl
271	SOILL *	Liquid volumetric soil moisture (non-frozen) [fraction]	0-10 cm down	anl
272	TSOIL *	Soil temp. [K]	10-40 cm down	anl
273	SOILW *	Volumetric soil moisture (frozen + liquid) [fraction]	10-40 cm down	anl
274	SOILL *	Liquid volumetric soil moisture (non-frozen) [fraction]	10-40 cm down	anl
275	TSOIL *	Soil temp. [K]	40-100 cm down	anl
276	SOILW *	Volumetric soil moisture (frozen + liquid) [fraction]	40-100 cm down	anl
277	SOILL *	Liquid volumetric soil moisture (non-frozen) [fraction]	40-100 cm down	anl
278	TSOIL *	Soil temp. [K]	100-200 cm down	anl
279	SOILW *	Volumetric soil moisture (frozen + liquid) [fraction]	100-200 cm down	anl



<u>rec #</u>	<u>wqrib</u> <u>abbrev.</u>	<u>Name and unit</u>	<u>level/layer type</u>	<u>time</u>
280	SOILL *	Liquid volumetric soil moisture (non-frozen) [fraction]	100-200 cm down	anl
281	TSOIL *	Soil temp. [K]	800 cm down	anl
282	MSTAV *	Moisture availability [%]	0-100 cm down	anl
283	SOILX *	Soil moisture content [kg/m^2]	0-200 cm down	anl
284	CNWAT *	Plant canopy surface water [kg/m^2]	sfc	anl
285	WEASD *	Accum. snow [kg/m^2]	sfc	anl
286	SNOWC *	Snow cover [%]	sfc	anl
287	SNOD *	Snow depth [m]	sfc	anl
288	TMP *	Temp. [K]	2 m above gnd	anl
289	SPFH *	Specific humidity [kg/kg]	2 m above gnd	anl
290	DPT *	Dew point temp. [K]	2 m above gnd	anl
291	RH *	Relative humidity [%]	2 m above gnd	anl
292	PRES *	Pressure [Pa]	2 m above gnd	anl
293	UGRD *	u wind [m/s]	10 m above gnd	anl
294	VGRD *	v wind [m/s]	10 m above gnd	anl
295	POT *	Potential temp. [K]	10 m above gnd	anl
296	TMP *	Temp. [K]	10 m above gnd	anl
297	PRES *	Pressure [Pa]	10 m above gnd	anl
298	SPFH *	Specific humidity [kg/kg]	10 m above gnd	anl
299	UGRD *	u wind [m/s]	30 m above gnd	anl
300	VGRD *	v wind [m/s]	30 m above gnd	anl
301	POT *	Potential temp. [K]	30 m above gnd	anl
302	TMP *	Temp. [K]	30 m above gnd	anl
303	PRES *	Pressure [Pa]	30 m above gnd	anl
304	SPFH *	Specific humidity [kg/kg]	30 m above gnd	anl
305	FRICV *	Surface friction velocity [m/s]	sfc	anl
306	CD *	Surface drag coefficient [non-dim]	sfc	anl
307	UFLX *	Zonal momentum flux [N/m^2]	sfc	anl
308	VFLX *	Meridional momentum flux [N/m^2]	sfc	anl
309	SFEXC *	Exchange coefficient [(kg/m^3)(m/s)]	sfc	anl
310	VEG *	Vegetation [%]	sfc	anl
311	CCOND *	Canopy conductance [m/s]	sfc	anl
312	RCS *	Solar parameter in canopy conductance [fraction]	sfc	anl
313	RCT *	Temperature parameter in canopy conductance [fraction]	sfc	anl
314	RCQ *	Humidity parameter in canopy conductance [fraction]	sfc	anl
315	RCSOL *	Soil moisture parameter in canopy conductance [fraction]	sfc	anl
316	LFTX	Surface lifted index [K]	500-1000 mb	anl
317	CAPE	Convective available potential energy [J/kg]	sfc	anl
318	CIN	Convective inhibition [J/kg]	sfc	anl
319	PWAT	Precipitable water [kg/m^2]	atmos col	anl
320	PRES *	Pressure [Pa]	cld base	anl
321	HGT *	Geopotential height [gpm]	cld base	anl
322	PRES *	Pressure [Pa]	cld top	anl
323	HGT *	Geopotential height [gpm]	cld top	anl
324	TMP *	Temp. [K]	cld top	anl
325	HLCY	Storm relative helicity [m^2/s^2]	3000-0 m above gnd	anl
326	USTM	u-component of storm motion [m/s]	6000-0 m above gnd	anl
327	VSTM	v-component of storm motion [m/s]	6000-0 m above gnd	anl
328	PRES	Pressure [Pa]	tropopause	anl
329	HGT	Geopotential height [gpm]	tropopause	anl
330	TMP	Temp. [K]	tropopause	anl
331	UGRD	u wind [m/s]	tropopause	anl
332	VGRD	v wind [m/s]	tropopause	anl
333	VWSH	Vertical speed shear [1/s]	tropopause	anl
334	PRES	Pressure [Pa]	max wind lev	anl
335	HGT	Geopotential height [gpm]	max wind lev	anl
336	UGRD	u wind [m/s]	max wind lev	anl

<u>rec #</u>	<u>wgrib</u> <u>abbrev.</u>	<u>Name and unit</u>	<u>level/layer type</u>	<u>time</u>
337	VGRD	v wind [m/s]	max wind lev	anl
338	HGT	Geopotential height [gpm]	0C isotherm	anl
339	RH	Relative humidity [%]	0C isotherm	anl
340	TMP	* Temp. [K]	30-0 mb above gnd	anl
341	SPFH	* Specific humidity [kg/kg]	30-0 mb above gnd	anl
342	MCONV	* Horizontal moisture divergence [kg/kg/s]	30-0 mb above gnd	anl
343	UGRD	* u wind [m/s]	30-0 mb above gnd	anl
344	VGRD	* v wind [m/s]	30-0 mb above gnd	anl
345	VVEL	* Pressure vertical velocity [Pa/s]	30-0 mb above gnd	anl
346	TMP	* Temp. [K]	60-30 mb above gnd	anl
347	SPFH	* Specific humidity [kg/kg]	60-30 mb above gnd	anl
348	MCONV	* Horizontal moisture divergence [kg/kg/s]	60-30 mb above gnd	anl
349	UGRD	* u wind [m/s]	60-30 mb above gnd	anl
350	VGRD	* v wind [m/s]	60-30 mb above gnd	anl
351	VVEL	* Pressure vertical velocity [Pa/s]	60-30 mb above gnd	anl
352	TMP	* Temp. [K]	90-60 mb above gnd	anl
353	SPFH	* Specific humidity [kg/kg]	90-60 mb above gnd	anl
354	MCONV	* Horizontal moisture divergence [kg/kg/s]	90-60 mb above gnd	anl
355	UGRD	* u wind [m/s]	90-60 mb above gnd	anl
356	VGRD	* v wind [m/s]	90-60 mb above gnd	anl
357	VVEL	* Pressure vertical velocity [Pa/s]	90-60 mb above gnd	anl
358	TMP	* Temp. [K]	120-90 mb above gnd	anl
359	SPFH	* Specific humidity [kg/kg]	120-90 mb above gnd	anl
360	MCONV	* Horizontal moisture divergence [kg/kg/s]	120-90 mb above gnd	anl
361	UGRD	* u wind [m/s]	120-90 mb above gnd	anl
362	VGRD	* v wind [m/s]	120-90 mb above gnd	anl
363	VVEL	* Pressure vertical velocity [Pa/s]	120-90 mb above gnd	anl
364	TMP	* Temp. [K]	150-120 mb above gnd	anl
365	SPFH	* Specific humidity [kg/kg]	150-120 mb above gnd	anl
366	MCONV	* Horizontal moisture divergence [kg/kg/s]	150-120 mb above gnd	anl
367	UGRD	* u wind [m/s]	150-120 mb above gnd	anl
368	VGRD	* v wind [m/s]	150-120 mb above gnd	anl
369	VVEL	* Pressure vertical velocity [Pa/s]	150-120 mb above gnd	anl
370	TMP	* Temp. [K]	180-150 mb above gnd	anl
371	SPFH	* Specific humidity [kg/kg]	180-150 mb above gnd	anl
372	MCONV	* Horizontal moisture divergence [kg/kg/s]	180-150 mb above gnd	anl
373	UGRD	* u wind [m/s]	180-150 mb above gnd	anl
374	VGRD	* v wind [m/s]	180-150 mb above gnd	anl
375	VVEL	* Pressure vertical velocity [Pa/s]	180-150 mb above gnd	anl
376	4LFTX	Best (4-layer) lifted index [K]	180-0 mb above gnd	anl
377	CAPE	Convective available potential energy [J/kg]	180-0 mb above gnd	anl
378	CIN	Convective inhibition [J/kg]	180-0 mb above gnd	anl
379	PRES	Pressure [Pa]	cond lev	anl
380	ALBDO	* Albedo [%]	sfc	anl
381	PRATE	Precipitation rate [kg/m^2/s]	sfc	3hr fcst
382	APCP	Total precipitation [kg/m^2]	sfc	0-3hr acc
383	APCPN	* Total precipitation (nearest grid point) [kg/m^2]	sfc	0-3hr acc
384	ACPCP	Convective precipitation [kg/m^2]	sfc	0-3hr acc
385	SNOM	* Snow melt [kg/m^2]	sfc	0-3hr acc
386	SSRUN	* Surface runoff (non-infiltrating) [kg/m^2]	sfc	0-3hr acc
387	BGRUN	* Subsurface runoff (baseflow) [kg/m^2]	sfc	0-3hr acc
388	CSNOW	* Categorical snow [yes=1 no=0]	sfc	3hr fcst
389	CICEP	* Categorical ice pellets [yes=1 no=0]	sfc	3hr fcst
390	CFRZR	* Categorical freezing rain [yes=1 no=0]	sfc	3hr fcst
391	CRAIN	* Categorical rain [yes=1 no=0]	sfc	3hr fcst
392	LHTFL	* Latent heat flux [W/m^2]	sfc	0-3hr ave
393	SHTFL	* Sensible heat flux [W/m^2]	sfc	0-3hr ave

<u>rec #</u>	<u>wqrib</u> <u>abbrev.</u>	<u>Name and unit</u>	<u>level/layer type</u>	<u>time</u>
394	GFLUX *	Ground Heat Flux [W/m^2]	sfc	0-3hr ave
395	SNOHF *	Snow phase-change heat flux [W/m^2]	sfc	0-3hr ave
396	EVP *	Evaporation [kg/m^2]	sfc	0-3hr acc
397	PEVAP *	Potential evaporation [kg/m^2]	sfc	0-3hr acc
398	WVCONV	Water vapor flux convergence (vertical int) [kg/m^2/s]	atmos col	0-3hr acc
399	WVCONV	Water vapor flux convergence (vertical int) [kg/m^2/s]	0-700 mb	0-3hr acc
400	WCCONV	Water condensate flux convergence (vertical int) [kg/m^2/s]	atmos col	0-3hr acc
401	WCCONV	Water condensate flux convergence (vertical int) [kg/m^2/s]	0-700 mb	0-3hr acc
402	WVUFLX	Water vapor zonal flux (vertical int) [kg/m]	atmos col	0-3hr acc
403	WVUFLX	Water vapor zonal flux (vertical int) [kg/m]	0-700 mb	0-3hr acc
404	WVVFLX	Water vapor meridional flux (vertical int) [kg/m]	atmos col	0-3hr acc
405	WVVFLX	Water vapor meridional flux (vertical int) [kg/m]	0-700 mb	0-3hr acc
406	WCUFLX	Water condensate zonal flux (vertical int) [kg/m]	atmos col	0-3hr acc
407	WCUFLX	Water condensate zonal flux (vertical int) [kg/m]	0-700 mb	0-3hr acc
408	WCVFLX	Water condensate meridional flux (vertical int) [kg/m]	atmos col	0-3hr acc
409	WCVFLX	Water condensate meridional flux (vertical int) [kg/m]	0-700 mb	0-3hr acc
410	WVINC	water vapor added by precip assimilation [kg/m^2/s]	atmos col	0-3hr acc
411	WVINC	water vapor added by precip assimilation [kg/m^2/s]	0-700 mb	0-3hr acc
412	WCINC	water condensate added by precip assimilaition [kg/m^2/s]	atmos col	0-3hr acc
413	WCINC	water condensate added by precip assimilaition [kg/m^2/s]	0-700 mb	0-3hr acc
414	LCDC	Low level cloud cover [%]	low cld lay	3hr fcst
415	MCDC	Mid level cloud cover [%]	mid cld lay	3hr fcst
416	HCDC	High level cloud cover [%]	high cld lay	3hr fcst
417	TCDC	Total cloud cover [%]	atmos col	3hr fcst
418	CDLYR	Non-convective cloud [%]	atmos col	0-3hr ave
419	CDCON	Convective cloud cover [%]	atmos col	0-3hr ave
420	DSWRF *	Downward shortwave radiation flux [W/m^2]	sfc	0-3hr ave
421	DLWRF *	Downward longwave radiation flux [W/m^2]	sfc	0-3hr ave
422	USWRF *	Upward short wave radiation flux [W/m^2]	sfc	0-3hr ave
423	ULWRF *	Upward long wave radiation flux [W/m^2]	sfc	0-3hr ave
424	USWRF	Upward short wave radiation flux [W/m^2]	nom. top	0-3hr ave
425	ULWRF	Upward long wave radiation flux [W/m^2]	nom. top	0-3hr ave

**MERGED B (merged\_AWIP32.YYYYMMDDHH.b)**

1	WEASD *	Accum. snow [kg/m^2]	sfc	3hr fcst
2	SHTFL *	Sensible heat flux [W/m^2]	sfc	3hr fcst
3	LHTFL *	Latent heat flux [W/m^2]	sfc	3hr fcst
4	GFLUX *	Ground Heat Flux [W/m^2]	sfc	3hr fcst
5	PWAT	Precipitable water [kg/m^2]	atmos col	3hr fcst
6	DSWRF *	Downward shortwave radiation flux [W/m^2]	sfc	3hr fcst
7	DLWRF *	Downward longwave radiation flux [W/m^2]	sfc	3hr fcst
8	USWRF *	Upward short wave radiation flux [W/m^2]	sfc	3hr fcst
9	ULWRF *	Upward long wave radiation flux [W/m^2]	sfc	3hr fcst

**LAND A subset (landA.YYYYMMDDHH)**

1	PRES	Pressure [Pa]	sfc	anl
2	TMP *	Temp. [K]	2 m above gnd	anl
3	SPFH *	Specific humidity [kg/kg]	2 m above gnd	anl
4	RH *	Relative humidity [%]	2 m above gnd	anl
5	UGRD *	u wind [m/s]	10 m above gnd	anl
6	VGRD *	v wind [m/s]	10 m above gnd	anl
7	POT *	Potential temp. [K]	10 m above gnd	anl
8	TMP *	Temp. [K]	10 m above gnd	anl



<u>rec #</u>	<u>wqrib</u> <u>abbrev.</u>	<u>Name and unit</u>	<u>level/layer type</u>	<u>time</u>
9	PRES *	Pressure [Pa]	10 m above gnd	anl
10	SPFH *	Specific humidity [kg/kg]	10 m above gnd	anl
11	APCP	Total precipitation [kg/m^2]	sfc	0-3hr acc
12	ACPCP	Convective precipitation [kg/m^2]	sfc	0-3hr acc
13	DSWRF *	Downward shortwave radiation flux [W/m^2]	sfc	0-3hr ave
14	DLWRF *	Downward longwave radiation flux [W/m^2]	sfc	0-3hr ave
15	CAPE	Convective available potential energy [J/kg]	180-0 mb above gnd	anl

**LAND B subset (landB.YYYYMMDDHH)**

1	MSLET	Mean sea level pressure (ETA model) [Pa]	MSL	anl
2	TMP	Temp. [K]	1000 mb	anl
3	PRESN *	Pressure (nearest grid point) [Pa]	sfc	anl
4	UGRD *	u wind [m/s]	30 m above gnd	anl
5	VGRD *	v wind [m/s]	30 m above gnd	anl
6	POT *	Potential temp. [K]	30 m above gnd	anl
7	TMP *	Temp. [K]	30 m above gnd	anl
8	PRES *	Pressure [Pa]	30 m above gnd	anl
9	SPFH *	Specific humidity [kg/kg]	30 m above gnd	anl
10	PRES *	Pressure [Pa]	hybrid lev 1	anl
11	HGT *	Geopotential height [gpm]	hybrid lev 1	anl
12	TMP *	Temp. [K]	hybrid lev 1	anl
13	POT *	Potential temp. [K]	hybrid lev 1	anl
14	SPFH *	Specific humidity [kg/kg]	hybrid lev 1	anl
15	UGRD *	u wind [m/s]	hybrid lev 1	anl
16	VGRD *	v wind [m/s]	hybrid lev 1	anl
17	TKE *	Turbulent Kinetic Energy [J/kg]	hybrid lev 1	anl
18	BMIXL	Blackadars mixing length scale [m]	hybrid lev 1	anl
19	FRICV *	Surface friction velocity [m/s]	sfc	anl
20	CD *	Surface drag coefficient (non-dim)	sfc	anl
21	UFLX *	Zonal momentum flux [N/m^2]	sfc	anl
22	VFLX *	Meridional momentum flux [N/m^2]	sfc	anl
23	SFEXC *	Exchange coefficient [(kg/m^3) (m/s)]	sfc	anl
24	HPBL	Planetary boundary layer height [m]	sfc	anl
25	TMP *	Temp. [K]	sfc	anl
26	POT *	Potential temp. [K]	sfc	anl
27	TSOIL *	Soil temp. [K]	0-10 cm down	anl
28	SOILW *	Volumetric soil moisture (frozen + liquid) [fraction]	0-10 cm down	anl
29	SOILL *	Liquid volumetric soil moisture (non-frozen) [fraction]	0-10 cm down	anl
30	TSOIL *	Soil temp. [K]	10-40 cm down	anl
31	SOILW *	Volumetric soil moisture (frozen + liquid) [fraction]	10-40 cm down	anl
32	SOILL *	Liquid volumetric soil moisture (non-frozen) [fraction]	10-40 cm down	anl
33	TSOIL *	Soil temp. [K]	40-100 cm down	anl
34	SOILW *	Volumetric soil moisture (frozen + liquid) [fraction]	40-100 cm down	anl
35	SOILL *	Liquid volumetric soil moisture (non-frozen) [fraction]	40-100 cm down	anl
36	TSOIL *	Soil temp. [K]	100-200 cm down	anl
37	SOILW *	Volumetric soil moisture (frozen + liquid) [fraction]	100-200 cm down	anl
38	SOILL *	Liquid volumetric soil moisture (non-frozen) [fraction]	100-200 cm down	anl
39	MSTAV *	Moisture availability [%]	0-100 cm down	anl
40	SOILM *	Soil moisture content [kg/m^2]	0-200 cm down	anl
41	CNWAT *	Plant canopy surface water [kg/m^2]	sfc	anl
42	WEASD *	Accum. snow [kg/m^2]	sfc	anl
43	SNOD *	Snow depth [m]	sfc	anl
44	SNOWC *	Snow cover [%]	sfc	anl
45	ALBDO *	Albedo [%]	sfc	anl

<u>rec #</u>	<u>wqrib</u> <u>abbrev.</u>	<u>Name and unit</u>	<u>level/lower type</u>	<u>time</u>
46	VEG *	Vegetation [%]	sfc	anl
47	CCOND *	Canopy conductance [m/s]	sfc	anl
48	RCSOL *	Soil moisture parameter in canopy conductance [fraction]	sfc	anl
49	VIS	Visibility [m]	sfc	anl
50	LCDC	Low level cloud cover [%]	low cld lay	3hr fcst
51	TCDC	Total cloud cover [%]	atmos col	3hr fcst

#### LAND C subset (landC.YYYYMMDDHH)

1	APCPN *	Total precipitation (nearest grid point) [kg/m^2]	sfc	0-3hr acc
2	SNOY *	Snow melt [kg/m^2]	sfc	0-3hr acc
3	SSRUN *	Surface runoff (non-infiltrating) [kg/m^2]	sfc	0-3hr acc
4	BGRUN *	Subsurface runoff (baseflow) [kg/m^2]	sfc	0-3hr acc
5	EVP *	Evaporation [kg/m^2]	sfc	0-3hr acc
6	PEVAP *	Potential evaporation [kg/m^2]	sfc	0-3hr acc
7	LHTFL *	Latent heat flux [W/m^2]	sfc	0-3hr ave
8	SHTFL *	Sensible heat flux [W/m^2]	sfc	0-3hr ave
9	GFLUX *	Ground Heat Flux [W/m^2]	sfc	0-3hr ave
10	SNOHF *	Snow phase-change heat flux [W/m^2]	sfc	0-3hr ave
11	ULWRF *	Upward long wave radiation flux [W/m^2]	sfc	0-3hr ave
12	USWRF *	Upward short wave radiation flux [W/m^2]	sfc	0-3hr ave

#### FIXED fields

1	HGT	Geopotential height [gpm]	sfc	anl
2	HGTN	Geopotential Height (nearest grid point) [gpm]	sfc	anl
3	TSOIL	Soil temp. [K]	800 cm down	anl
4	SMDRY	Direct evaporation cease (soil moisture) [fraction]	sfc	anl
5	POROS	Soil porosity [fraction]	sfc	anl
6	SFCR	Surface roughness [m]	sfc	anl
7	VG Typ	Vegetation type [Index]	sfc	anl
8	SOTYP	Soil type [Index]	sfc	anl
9	SLTYP	Surface slope type [Index]	sfc	anl
10	RSMIN	Minimal stomatal resistance [s/m]	sfc	anl
11	RLYRS	Number of soil layers in root zone [non-dim]	sfc	anl
12	WILT	Wilting point [fraction]	sfc	anl
13	SMREF	Transpiration stress-onset (soil moisture) [fraction]	sfc	anl
14	NLAT	Latitude (-90 to +90) [deg]	sfc	anl
15	ELON	East longitude (0-360) [deg]	sfc	anl
16	LAND	Land cover (land=1;sea=0) [fraction]	sfc	anl
17	SNFALB	Snow-free albedo [%]	sfc	anl
18	MXSALB	Maximum snow albedo [%]	sfc	anl

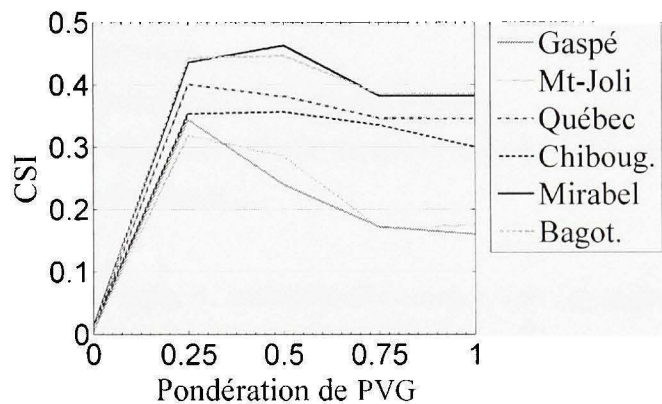
#### Notes:

- asterisk in third column denotes fields interpolated using nearest-neighbor option
- 8 merged A and B files (every 3 hours) are archived in a single daily tar file (approx. 450Mb)
- 8 land A, B and C files (every 3 hours) are archived in a single daily tar file (approx. 75Mb)

### ANNEXE III

#### ANALYSE SUR LA LIMITE À UTILISER POUR LA VALEUR PONDÉRÉE DE LA PRÉVISION DE PLUIE VERGLAÇANTE

La valeur de la variable dichotomique de la prévision de pluie verglaçante est de un lorsqu'il y a pluie verglaçante et de zéro lorsqu'il n'y en a pas. Quand cette valeur est pondérée à partir des quatre points les plus près d'un aéroport, la variable peut alors prendre n'importe quelle valeur entre zéro et un. Il est alors nécessaire de définir une limite à partir de laquelle il est considéré qu'il y a de la pluie verglaçante à l'aéroport. Cette limite est fixée à 0.25. Pour vérifier la validité de celle-ci, le  $\overline{CSI}$  (défini à la sous-section 3.3.1) a été évalué pour des limites allant de zéro à un par pas de 0.25. Ce test permet de voir que la meilleure correspondance dans le temps entre les prévisions de pluie verglaçantes et les observations de précipitations givrantes se produit quand la limite est fixée à 0.25. Le graphique ci-dessous III.1 illustre de quelle manière le CSI évolue en fonction de la limite imposée.



**Figure III.1** *Test sur la limite à imposer à la prévision de pluie verglaçante pondérée.*



## ANNEXE IV

### TEST D'HYPOTHÈSE « T-TEST »

Un test d'hypothèse est un test qui consiste à rejeter ou accepter une hypothèse statistique, appelée hypothèse nulle, pour un échantillon de données. Dans ce cas-ci, il est question de rejeter ou d'accepter l'hypothèse selon laquelle la relation entre les heures de givrage atmosphérique prédites et observées pourrait être modélisée par une pente nulle ( $m_o = 0$ ). Le  $t$ -test est utilisé pour effectuer cette vérification et il s'exprime par l'inégalité suivante (inégalité IV.1) :

$$\frac{m - m_o}{\sqrt{\sigma^2/S_{xx}}} > t_{\alpha/2, n-2} \quad (\text{IV.1})$$

où :  $m$  est la pente de la droite des moindres carrés tracée entre les prédictions

et les observations ;

$m_o$  est l'hypothèse nulle ;

$\sigma$  est l'estimé de l'écart-type ;

$S_{xx}$  est la somme exprimée par l'équation IV.2, et ;

$t_{\alpha/2, n-2}$  est la valeur de la distribution Student  $t$  donnée pour un niveau de confiance de  $\alpha$  et  $n - 2$  degrés de liberté ;

Le  $S_{xx}$  et l'estimé de l'écart-type,  $\sigma$ , sont calculés comme suit (équations IV.2 et IV.3) :

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \quad (\text{IV.2})$$

$$\sigma = \sqrt{\left( \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - PC_i)^2}{n - 2} \right)} \quad (\text{IV.3})$$

Dans ces équations,  $P_i$  sont les prédictions,  $PC_i$  les prédictions corrigées,  $\bar{P}$  la moyenne des prédictions,  $O_i$  les observations, et  $n$  le nombre de données.

Pour le test effectué ici, un niveau de confiance de 95 % a été choisi, ce qui équivaut à une valeur de  $\alpha$  de 0.05. La valeur de  $t_{\alpha/2, n-2}$  est par conséquent de 2.032. Avec  $m = 0.14$ ,  $m_o$

$= 0$ ,  $\sigma = 23.77$  et  $S_{xx} = 1060808$ , le terme de gauche de l'inégalité IV.1 donne une valeur de 6.07. Par conséquent, l'hypothèse nulle ( $m_o = 0$ ) peut être rejetée ; ce qui veut dire qu'avec un niveau de confiance de 95 %, il est possible d'affirmer que les données ne peuvent être modélisées par une droite dont la pente serait nulle.

## BIBLIOGRAPHIE

- Aben, T.J. 2003. *Operation of Wind Turbines in Icing Climates, A Technical Review*. Rapport technique 14162-32-01. Powertech Labs Inc., Surrey, Canada. 30 p.
- American Meteorological Society. 2000. *Glossary of Meteorology, 2nd Edition*. American Meteorological Society. En ligne. <<http://amsglossary.allenpress.com/glossary>>. Consulté le 22 juillet 2006.
- Benoît, Robert. 2007. *Correspondance personnelle*. Le 20 juillet 2007.
- Bernstein, B.C., McDonough, F., Politovich, M.K., et Brown, B.G. 2005. Current Icing Potential : Algorithm Description and Comparison with Aircraft Observations. *Journal of Applied Meteorology*, **44**, 969–986.
- Bourgouin, P. 2000. Method to determine precipitation types. *Weather and Forecasting*, **15**(5), 583–592.
- Campbell Scientific. 2003. *CC640 Images*. Campbell Scientific. En ligne. <<http://www.campbellsci.ca/CC640/Images.html>>. Consulté le 7 mars 2008.
- Campbell Scientific. 2005. *CC640 digital camera*. Campbell Scientific. En ligne. <<http://www.campbellsci.ca/Catalogue/CC640.html>>. Consulté le 21 janvier 2008.
- Carrière, J-C. 2006. *Correspondance personnelle*. Le 8 mars 2006.
- Cattin, R., Heimo, A., Kunz, S., Russi, G., Russi, M., Tiefgraber, M., Schaffner, S., et Nygaard, B.E. 2007. Alpine Test Site Geutsch, Meteorological measurements and wind turbine performance analysis. In *Proc of the 12<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*. Yokohama, Japan.
- Chum, J., et Vojta, J. 2005. *Icemeter*. Institute of Atmospheric Physics. Prague, Czech Republic, 1 p.
- Claffey, K.J., Jones, K.F., et Ryerson, C.C. 1995. Use and calibration of Rosemount ice detectors for meteorological research. *Atmospheric Research*, **36**, 277–286.
- Clark, J. I. 2006. *Photo de gelée*. Ridgway Community Photo Gallery. En ligne. <[http://www.town.ridgway.co.us/photo\\_index.htm](http://www.town.ridgway.co.us/photo_index.htm)>. Consulté le 30 juillet 2006.
- Cober, S. G., Isaac, G. A., et Korolev, A. V. 2001. Assessing the Rosemount icing detector with in situ measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **18**(4), 515–528.
- Combitech AB. 2007. *ICE MONITOR, The Ice Load Surveillance Sensor*. En ligne. <<http://www.rwis.net/IceMonitor.htm>>. Consulté le 30 novembre 2007.



- Comeau, M., Masson, C., Morency, F., et Pelletier, F. 2007. Prediction of icing events using NARR data. *In Proc of the 12<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*. Yokohama, Japan.
- Comeau, M., Masson, C., Morency, F., et Pelletier, F. 2008. Mapping mean annual icing hours for the Québec wind energy industry. *In Proc of the 18<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference*. Vancouver, Canada.
- Comission Electrotechnique Internationale. 1998. *IEC 61400-12 Aérogénérateurs - Partie 12 : Techniques de mesure des performances de puissance*. Comission Electrotechnique Internationale. Norme de la Comission Electrotechnique Internationale, Genève, Suisse, 90 p.
- Cortinas Jr., John V., Bernstein, B.C., Robbins, C. Christopher, et Strapp, J. Walter. 2004. An Analysis of Freezing Rain, Freezing Drizzle, and Ice Pellets across the United States and Canada : 1976-90. *Weather and Forecasting*, **19**, 377–390.
- Daily, T., et Daily, D. 2006. *Heavy wet snow*. En ligne. <[http://www.dailyfamily.net/some\\_fun\\_pictures.htm](http://www.dailyfamily.net/some_fun_pictures.htm)>. Consulté le 16 juillet 2006.
- Dobesch, H., Zach, S., et Tran, H.V. 2003. A New Map of Icing Potentials in Europe - Problems and Results. *In Proc of the BOREAS VI Conference*. Pyhänturi, Finland.
- Drouin, B. 2006. *Correspondance personnelle*. Le 8 mars 2006.
- Druez, J., et McComber, P. 1996. An analysis of the icing of test cables. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **24**, 637–648.
- Druez, J., McComber, P., et Farzaneh, M. 1999. Analysis of Atmospheric Icing Events Observed at the Mount Valin Test Site During the 1995-96 Season. *Pages 574–580 of Proc of the 9<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference*, vol. 2. Brest, France.
- EGÚ Brno. 2006. *METEO*. En ligne. <<http://www.egubrno.cz/cz/sekce2/projekty/meteo/METEO%20en.pdf>>. Consulté le 24 juin 2006.
- ElFashny, K. N. G. 2002. *Modeling Ice Loads using Passive Ice Meter Observations in Quebec*. Thèse de doctorat, McGill University, Montreal, Canada. 220 p.
- ElFashny, K. N. G., Chouinard, L. E., Nguyen, V. T. V., et Laflamme, J. N. 1998. Characteristics of icing events in Quebec. *Pages 537–542 of Proc of the 8<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference*, vol. 2. Montreal, Canada.
- Environnement Canada. 1987. *Atlas climatique du Canada, Série de cartes illustrant le climat du Canada*. Nombre moyen de jours avec précipitations verglaçantes, Ottawa, Canada.
- Environnement Canada. 2003. *Survol des produits climatiques*. En ligne. <<http://ice-glaces.ec.gc.ca/App/WsvPageDsp.cfm?ID=11712&Lang=fre>>. Consulté le 6 mars 2008.

- Environnement Canada. 2005. *Historique : Historique des modèles et analyses*. En ligne. <[http://www.smc-msc.ec.gc.ca/cmc/op\\_systems/historical\\_f.html?>](http://www.smc-msc.ec.gc.ca/cmc/op_systems/historical_f.html?>). Consulté le 20 mars 2007.
- Environnement Canada. 2008a. *Chapitre 1 : Système d'observation météorologique automatisée (AWOS)*. En ligne. <[http://www.msc-smc.ec.gc.ca/msb/manuals/awos/chap1\\_f.html\#122\\_f](http://www.msc-smc.ec.gc.ca/msb/manuals/awos/chap1_f.html\#122_f)>. Consulté le 27 mai 2006.
- Environnement Canada. 2008b. *Québec - Résumé des conditions actuelles*. En ligne. <[http://www.meteo.gc.ca/forecast/canada/summary\\_f.html?QC](http://www.meteo.gc.ca/forecast/canada/summary_f.html?QC)>. Consulté le 6 mars 2008.
- European Centre for Medium Range Weather Forecasts. 2003. *ECMWF Re-Analysis ERA-40*. En ligne. <<http://www.ecmwf.int/research/era/?track=hotlinks>>. Consulté le 7 mars 2008.
- Farzaneh, M., et Savadjiev, K. 2005. Statistical Analysis of Field Data for Precipitation Icing Accretion on Overhead Power Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **20**(2), 1080–1087.
- Farzaneh, M., Savadjiev, K., et Druez, J. 2001. Icing Event Occurrence in Québec : Statistical Analysis of Field Data. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, **11**(1), 9 – 15.
- Federal Aviation Administration. 2008. *Weather Cameras*. Federal Aviation Administration. En ligne. <<http://akweathercams.faa.gov/>>. Consulté le 6 mars 2008.
- Fikke, S., Ronsten, G., Heimo, A., Kunz, S., Ostrozlik, M., Persson, P-E., Sabata, J., Wareing, B., Wichura, B., Chum, J., Laakso, T., Sääntti, K., et Makkonen, L. 2007. *COST 727 : Atmospheric Icing on Structures, Measurements and data collection on icing : State of the Art*. Rapport technique 75. Meteo Swiss, Zurich, Switzerland. 110 p.
- Fikke, S.M., Sääntti, K., et Laakso, T. 2005. Detectors for atmospheric icing. *In Proc of the BOREAS VII Conference*. Saariselkä, Finland.
- Fortin, G. 2003. *Simulation de l'accrétion de glace sur un obstacle bidimensionnel par la méthode des bissectrices et par la modélisation des ruisselets et des gouttes de surface*. Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Canada. 248 p.
- Fortin, G. 2007. *6DIG966 Thermodynamique de la glace atmosphérique*. Notes de cours, Université du Québec à Chicoutimi, 260 p.
- Fortin, G., Ilinca, A., et Laforte, J.-L. 2004. Modèle d'accrétion de glace sur un objet bi-dimensionnel fixe applicable aux pales d'éoliennes. *VergtigO - La revue en science de l'environnement*, **5**(1), 1–9.



- Fortin, G., Perron, J., et Ilinca, A. 2006. *Caractérisation des conditions météorologiques et givrantes du site de l'ancienne mine Gaspé de Noranda à Murdochville pour la campagne de mesure 2005-2006*. Rapport technique. TechnoCentre Éolien Gaspésie-Les-Îles, Gaspé, Canada. 151 p.
- Goodrich Corporation. 2002a. *Freezing rain sensor*. Goodrich Corporation. En ligne. <[http://www.sensors.goodrich.com/literature/lit\\\_pdfs/4085\\_Rain\\_Sensor.pdf](http://www.sensors.goodrich.com/literature/lit\_pdfs/4085_Rain_Sensor.pdf)>. Consulté le 1<sup>er</sup> juillet 2006.
- Goodrich Corporation. 2002b. *Model 0871LH1 Ice Detector*. Goodrich Corporation. En ligne. <[http://www.sensors.goodrich.com/literature/lit\\\_pdfs/4095\\_Ice\\_Detector\\_0871LH1.pdf](http://www.sensors.goodrich.com/literature/lit\_pdfs/4095_Ice_Detector_0871LH1.pdf)>. Consulté le 1<sup>er</sup> juillet 2006.
- Guesdon, C. 2000. *Étude des répartitions des événements de verglas et de givre à travers le Québec*. Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Canada. 174 p.
- Hošek, J. 2007. Icing measurements at Milešovka and their comparison with reanalysis and mesoscale model outputs. *In Proc of the 12<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*. Yokohama, Japan.
- Isaac, G. A., Cober, S. G., Straap, J.W., Hudak, D., Ratvasky, T.P., Marcotte, D.L., et Fabry, F. 2001. Preliminary Results from the Alliance Icing Research Study (AIRS). *In Proc of the 39<sup>th</sup> Aerospace Science Meeting & Exhibit*. Reno, USA. AIAA-2001-0393.
- Kanamitsu, M., Ebisuzaki, W., Woollen, J., Yang, S-K., Hnilo, J.J., Fiorino, M., et Potter, G.L. 2002. NCEP/DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83** (11), 1631–1643.
- Karlsson, M. 2001. Prediction of hoar-frost by use of a Road Weather information System. *Meteorological Application*, **8**, 95–105.
- Kenyon, P. R., et Blittersdorf, D.C. 1996. *Accurate Wind Measurements in Icing Environments, Solutions and Problems of Invalid Data from Frozen Anemometers and Direction Vanes*. Rapport technique. NRG Systems, Hinesburg, USA. 9 p.
- Klock, R., Simard, G., et Mullock, J. 2001. *Le temps en Ontario et au Québec : Prévision de la zone graphique 33 - Ontario - Québec*. Canada : Nav Canada. 235 p.
- Laakso, T., et Peltola, E. 2003. Needs and requirements for ice detection in wind energy. *In Proc of the European Wind Energy Conference*. Madrid, Spain.
- Laakso, T., Peltola, E., Antikainen, P., et Peuranen, S. 2003a. Comparison of ice sensors for wind turbines. *In Proc of the BOREAS VI Conference*. Pyhäntunturi, Finland.
- Laakso, T., Holttinen, H., Ronsten, G., Tallhaug, L., Horbarty, R., Baring-Gould, I., Lacroix, A., et Tammelin, B. 2003b. *State-of-the-art of wind energy in cold climates*. Rapport technique. IEA R&D Wind, Wind Energy in Cold Climates. 53 p.



- Laakso, T., Tallhaug, L., Ronsten, G., Horbaty, R., Baring-Gould, I., Lacroix, A., et Peltola, E. 2005. *Wind Energy Projects in Cold Climates*. Rapport technique. VTT, Espoo, Finland. 36 p.
- Lacroix, A., et Manwell, J. F. 2000. *Wind Energy : Cold Weather Issues*. Rapport technique. University of Massachusetts at Amherst, Renewable Energy Research Laboratory, Amherst, USA. 17 p.
- Laflamme, J. N., et Périard, G. 1996. The Climate of Freezing Rain Over the Province of Québec in Canada, A Preliminary Analysis. *Pages 19–24 of Proc of the 7<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*. Chicoutimi, Canada.
- Laforte, J.-L., Allaire, M.A., et Laflamme, J. N. 1995. Wind tunnel evaluation of a rime metering device using a magnetorestrictive sensor. *Atmospheric Research*, **36**, 287–301.
- LeBot, C., et Lassegues, P. 2004. Climatology of Icing Areas Derived from ERA40 Analysis. *Pages 985–988 of Proc of the Conference on Aviation, Range and Aerospace Meteorology*. Hyannis, USA.
- Maissan, J., et Love, A. 2004. Wind Energy in the Yukon. *In Proc of the Alaska Rural Energy Conference*. Talkeetna, USA.
- Makkonen, L. 1984. *Atmospheric icing on sea structures*. Rapport technique 84-2. US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Hanover, USA. 102 p.
- Makkonen, L. 1994. *Ice and construction*. RILEM Report 13. London, UK : International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures. 101 p.
- Makkonen, L. 2000. Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures. *Philosophical Transactions of the Royal Society A : Mathematical, Physical & Engineering Sciences*, **358 (1776)**, 2913–2939.
- Makkonen, L. 2003. Evaluation of ice-free anemometers and ice detectors. *In Proc of the BOREAS VI Conference*. Pyhänturi, Finland.
- Makkonen, L., et Ahti, K. 1994. Climatic mapping of ice loads based on airport weather observations. *Atmospheric Research*, **36**, 185–193.
- Makkonen, L., et Laakso, T. 2005. Humidity Measurements in Cold and Humid Environments. *Boundary-Layer Meteorology*, **116**(1), 131–147.
- Manikin, G. 2005. An Overview of Precipitation Type Forecasting. *In Proc of the 21<sup>st</sup> Conference in Weather Analysis and Forecasting*. Washington, USA.
- Mazin, I.P, Korolev, A.V., Heymsfield, A., Isaac, G.A., et Cober, S.G. 2001. Thermodynamics of Icing Cylinder for Measurements of Liquid Water Content in Supercooled Clouds. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **18**, 543–558.

- McComber, P., Druez, J., et Laflamme, J. N. 1995. A comparison of selected models for estimating cable icing. *Atmospheric Research*, **36**, 207–220.
- McKay, G. A., et Thomson, H. A. 1969. Estimating the Hazard of Ice Accretion in Canada from Climatological Data. *Journal of Applied Meteorology*, **8**, 927–935.
- Mesinger, F., DiMego, G., Kalnay, E., Mitchell, K., Shafran, P.C., Ebisuzaki, W., Jovic, D., Woollen, J., Rogers, E., Berbery, E.H., Ek, M.B., Fan, Y., Grumbine, R., Higgins, W., Li, H., Lin, Y., Manikin, G., Parrish, D., et Shi, W. 2006. North American Regional Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **87**(3), 343–360.
- Milton, J., et Bourque, A. 1999. *Compte-rendu climatologique de la tempête de verglas de janvier 1998 au Québec*. Ottawa, Canada : Division des sciences atmosphériques et enjeux environnementaux d'Environnement Canada. 87 p.
- Minsk, L.D. 1980. *Icing on structures*. Rapport technique 80-31. US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Hanover, USA. 18 p.
- Météo France. 2003. *Glossaire*. Météo France. En ligne. <<http://www.meteofrance.com/FR/glossaire/index.jsp>>. Consulté le 11 juillet 2006.
- National Ocean and Atmospheric Administration. 2003. *RUC Information*. NOAA/Earth System Research Laboratory. En ligne. <<http://ruc.noaa.gov/>>. Consulté le 7 mars 2008.
- Nav Canada. 2008. *Nav Canada*. En ligne. <<http://www.navcanada.ca>>. Consulté le 6 mars 2008.
- NCEP. 2008. *North American Regional Reanalysis Homepage*. NCEP. En ligne. <<http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/rrean1/>>. Consulté le 6 mars 2008.
- New Avionics Corporation. 2008. *Ice Detection Systems*. New Avionics Corporation. En ligne. <<http://www.newavionics.com/>>. Consulté le 7 mars 2008.
- Nygaard, B., Kristjansson, J., Berge, E., et Makkonen, L. 2007. Using NWP models to simulate in-cloud atmospheric icing episodes. In *Proc of the 12<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*. Yokohama, Japan.
- Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research. 2005. *Federal Meteorological Handbook No. 1, Surface Weather Observations and Reports*. Washington, USA : Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research. 104 p.
- Oklahoma Climatological Survey. 2006. *Ice tower*. Oklahoma Climatological Survey. En ligne. <[http://www.ocs.ou.edu/whatsnew/ice\\_tower.jpg](http://www.ocs.ou.edu/whatsnew/ice_tower.jpg)>. Consulté le 20 juin 2006.



- Organisation internationale de normalisation. 2000. *ISO 12494 Charges sur les structures dues à la glace*. Norme de l'Organisation internationale de normalisation, Genève, Suisse, 60 p.
- Peltola, E., Laakso, T., Ronsten, G., Tallhaug, L., Horbaty, R., Gould-Baring, I., et Lacroix, A. 2005. Specific recommendations for the development of wind energy projects in cold climates. *In Proc of the BOREAS VII Conference*. Saariselkä, Finland.
- Pinard, J.-P., et Maissan, J. 2003. Experience from use of heated wind sensors and rime ice detectors over the past 12 years. *In Proc of the BOREAS VI Conference*. Pyhänturi, Finland.
- Plante, A. 2007. *Correspondance personnelle*. Le 12 janvier 2007.
- Poley, D. 2007. *Correspondance personnelle*. Le 12 décembre 2007.
- Poots, G. 1996. *Ice and Snow Accretion on Structures*. Applied and Engineering Mathematics. Exeter, Great Britan : Research Studies Press Ltd. 356 p.
- Popolanský, F., Kružík, J., et Kostelecký, I. 1992. New results of ice and wind investigation in Czechoslovakia and their utilisation when dimensioning overhead transmission lines. *In Proc of the CIGRÉ*. Paris, France.
- Ressources naturelles Canada. 2007. *Un temps de changement : Les changements climatiques au Québec*. En ligne. <[http://adaptation.nrcan.gc.ca/posters/qc/qc\\_07\\_f.php](http://adaptation.nrcan.gc.ca/posters/qc/qc_07_f.php)>. Consulté le 18 décembre 2007.
- Ressources naturelles et faune Québec. 2007. *Projets éoliens au Québec*. En ligne. <<http://www.mrnf.gouv.qc.ca/energie/eolien/eolien-potentiel-projets.jsp>>. Consulté le 2 février 2008.
- Ross, M. 2002. *Impacts of Turbine Icing at Rumble Ridge*. Rapport technique. GPCo inc., Varennes, Canada. 83 p.
- Ryerson, C.C. 1988. Atmospheric Icing Climatologies of Two New England Mountains. *Journal of applied meteorology*, **27**, 1261–1281.
- Säntti, K., Tammelin, B., Laakso, T., et Peltola, E. 2003. Experience from measurements of atmospheric icing. *In Proc of the BOREAS VI Conference*. Pyhänturi, Finland.
- Savadjiev, K., et Farzaneh, M. 2004. Modeling of Icing and Ice Shedding on Overhead Power Lines Based on Statistical Analysis of Meteorological Data. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **19**(2), 715–721.
- Schaffner, B. 2002. *Wind Energy Site Assessment in Harsh Climatic Conditions, Long Term Experience in the Swiss Alps*. Rapport technique. METEOTEST, Fabrikstrasse, Switzerland. 10 p.



- Schultz, P., et Politovich, M.K. 1992. Toward the Improvement of Aircraft-Icing Forecasts for the Continental United States. *Weather and Forecasting*, **7**, 491 – 500.
- Säntti, K., et Tammelin, B. 2002. *Tauernwindpark Oberzeiring - Wind Energy at Alpine Sites with Severe Weather Conditions*. Rapport technique NNE5-1999-00629. MET/Energy & Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland. 8 p.
- Stuart, R.A., et Isaac, G. A. 1999. Freezing precipitation in Canada. *Atmosphere-Ocean*, **37(1)**, 87–102.
- Sumner, G. 1988. *Precipitation Process and Analysis*. Bath, Great Britan : John Wiley & Sons. 472 p.
- Sundin, E., et Makkonen, L. 1998. Ice Loads on a Lattice Tower Estimated by Weather Station Data. *Journal of Applied Meteorology*, **37**, 523 – 529.
- Tallhaug, L. 2003. Calculation of Potential Ice Risk in Norway. *In Proc of the BOREAS VI Conference*. Pyhänturi, Finland.
- Tammelin, B., Säntti, K., Dobesch, H., Ganander, H., Kury, G., Laakso, T., Peltola, E., et Ronsten, G. 2005. *Wind Turbines in Icing Environment : Improvement of Tools for Siting, Certification and Operation - NEW ICETOOLS*. Rapport technique 2005 :6. FMI, Helsinki, Finland. 127 p.
- The Engineering Toolbox. 2008. *Density of Dry Air, Water Vapor and Moist Humid Air*. En ligne. <[http://www.engineeringtoolbox.com/density-air-d\\_680.html](http://www.engineeringtoolbox.com/density-air-d_680.html)>. Consulté le 17 mars 2008.
- Transport Canada. 2007. *NPA Archives*. En ligne. <<http://www.tc.gc.ca/civilaviation/Regserv/Affairs/carac/NPAs/ANS/Archives/nov99/RemarksStandards.htm>>. Consulté le 3 décembre 2007.
- University of Wyoming. 2007. *University of Wyoming, Department of Atmospheric Sciences - Weather*. University of Wyoming. En ligne. <<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>>. Consulté le 3 décembre 2007.
- Wavin-Labko. 2001. *Détecteur de givre Labko LID-3200*. Wavin-Labko. En ligne. <[www.labkotec.fi/file.php?src=/pdf/M80073\\_e2.pdf](http://www.labkotec.fi/file.php?src=/pdf/M80073_e2.pdf)>. Consulté le 6 juin 2006.
- Wavin-Labko. 2006. *LID-3210C Ice detector for wind turbines, Installation manual*. Wavin-Labko, Kangasala, Finland.
- Wichura, B. 2005. A Survey of Icing Measurements in Germany. *In Proc of the BOREAS VII Conference*. Saariselkä, Finland.
- Wilks, Daniel. 1995. *Statistical methods in the atmospheric sciences : An introduction*. San Diego, USA : Academic Press. 467 p.

Yang, Z. 2005. *Analysis of Rime Ice Accretion at Mont Bélair and Design of Transmission Lines*. Thèse de doctorat, McGill University, Montreal, Canada.