

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.Ing.

PAR
GILLENWATER, Daniel

PERTES DE PUISSANCE ASSOCIÉES AUX PHÉNOMÈNES GIVRANTS SUR UNE
ÉOLIENNE INSTALLÉE EN CLIMAT NORDIQUE

MONTRÉAL, LE 9 MAI 2008

© Daniel Gillenwater, 2008

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Christian Masson, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Jean Perron, codirecteur
Département des sciences appliquées à l'UQAC

M. François Morency, président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Simon Joncas, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

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

LE 2 MAI 2008

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

La propriété du parc éolien le Nordais a changée au cours de la rédaction de ce mémoire. Certaines données utilisées dans ce document sont désormais la propriété de Kenwind Industries. Usage autorisé par Industries Kenwind Itée, filiale en propriété exclusive de Canadian Hydro Developers, inc. (www.canhydro.com). Le logo de Canadian Hydro est une marque de commerce déposée ou une marque de commerce appartenant à Canadian Hydro Developers, inc.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de maîtrise, Christian Masson, ainsi que mon codirecteur de maîtrise, Jean Perron, pour l'opportunité qu'ils m'ont offerte de travailler au sein de la *Chaire de recherche du Canada sur l'aérodynamique des éoliennes en milieu nordique*. J'ose espérer qu'une partie de leurs connaissances et de leur sagesse rayonnera dans ce mémoire!

Je tiens également à remercier, Nathalie Dabin, étudiante au sein de la *Chaire*, pour m'avoir communiqué ses résultats préliminaires et pour m'avoir fait une présentation des données provenant du parc *Le Nordais*. Ces informations auront grandement contribué à me simplifier la tâche.

Des remerciements également pour les autres étudiants de la chaire. Je leur souhaite le plus grand plaisir et succès dans la poursuite de leurs travaux.

En terminant, je veux remercier Assumpta Cerdà pour son support et la patience dont elle a fait preuve lors de la relecture de ce mémoire.

PERTES DE PUISSANCE ASSOCIÉES AUX PHÉNOMÈNES GIVRANTS SUR UNE ÉOLIENNE INSTALLÉE EN CLIMAT NORDIQUE

GILLENWATER, Daniel

RÉSUMÉ

L'industrie éolienne connaît, depuis une décennie, un essor fulgurant. Dans toutes les régions du monde, on voit l'apparition de parcs éoliens de toutes dimensions. La technologie éolienne permet de produire de l'électricité à un coût concurrentiel en plus de permettre une réduction des gaz à effet de serre (GES). L'augmentation du nombre de projets ne doit pas faire oublier que les parcs éoliens sont soumis à plusieurs contraintes pouvant affecter leur rentabilité. L'une de ces contraintes est l'influence du climat nordique, et plus particulièrement des phénomènes givrants (brouillards givrants, pluies verglaçantes).

Les objectifs de ce mémoire sont d'identifier les phénomènes givrants ayant affecté le parc *Le Nordais*, situé à Matane et à Cap-Chat, et d'évaluer les pertes de performance causées par ces phénomènes givrants. On fait l'hypothèse dans ce mémoire, que les accrétions de glace sur les pales de l'éolienne mèneront à des pertes aérodynamiques et, dans certains cas, à l'arrêt complet de la turbine.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons rassemblé puis analysé les données d'opération du parc éolien pour une période allant de janvier 2000 à décembre 2003. Nous avons également utilisé les données d'*Environnement Canada* correspondant à cette plage temporelle.

Nous avons identifié **23** événements de givrage durant **308 heures** pour le site de Matane, et **19** événements de givrage durant **213 heures** pour le site de Cap-Chat. Durant ces événements givrants, la turbine de référence est arrêtée dans **2 %** des cas. Lorsqu'elle demeure en production, on observe une perte de performance moyenne d'environ **20 %**. Les pertes d'énergie annuelles varient de **766 kWh** à **24298 kWh**.

À la lumière de ces résultats, on ne peut que réaffirmer le besoin de prendre en compte les phénomènes givrants lors de l'évaluation économique des projets éoliens et lors de l'opération de ces parcs éoliens.

Mots-clés : éolienne, verglas, givre, précipitation, puissance, Cap-Chat, Matane

POWER LOSSES CAUSED BY ICING EVENTS ON A WIND TURBINE OPERATING IN A COLD CLIMATE SITE

GILLENWATER, Daniel

ABSTRACT

The wind power industry has been growing at a phenomenal pace during the last decade. Everywhere on this planet, we are seeing more and more wind farms of variable size. This technology enables electricity production at a competitive price, while at the same time reducing the amount of green house gas release in the atmosphere. It should not be forgotten, despite the sector's rapid growth, that the profitability of wind farm projects can be jeopardized by many constraints. Operation in cold climate and icing events are amongst those constraints.

The main objectives of this dissertation are the identification of icing events affecting the *Le Nordais*, a wind farm located in Cap-Chat and Matane, and the evaluation of the performance losses due to the icing events. We are assuming, in this dissertation, that ice accretions on blades will generate aerodynamic disruptions that could lead to complete plant stoppage.

In order to achieve the stated objectives, we have assembled and analyzed 4 years of operational data starting from January 2000 until December 2003. We have also used the corresponding data provided by *Environment Canada*.

We have identified **23** icing events lasting **308 hours** in Matane and **19** icing events totaling **213 hours** in Cap-Chat. During the icing events, the wind turbine of reference is completely stopped in **2%** of all cases. When the wind turbine stays in operation, we are observing average performance lost of **20%**. Annual energy losses range from **766 kWh** to **24298 kWh**.

These results show that a complete financial analysis of a wind farm project should include *precise* performance loss prediction. Furthermore, operation procedures during and icing events should be modified in order to reduce risks and maximize production.

Keywords : wind turbine, icing, power, performance, Cap-Chat, Matane

TABLE DES MATIÈRES

	Page
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Énergie éolienne : un bref aperçu	1
1.2 Énergie éolienne en climat nordique	3
1.2.1 Climat nordique	3
1.2.2 Problématiques des éoliennes en climat nordique	4
1.2.3 Technologies éoliennes adaptées au climat nordique	5
1.3 Objectifs et plan du mémoire	6
1.3.1 Problématique et objectif	6
1.3.2 Plan du mémoire	7
 CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	 9
2.1 Théorie des éoliennes	9
2.1.1 Types d'éoliennes	9
2.1.2 Puissance du vent	10
2.1.3 Puissance maximale d'une éolienne (Betz)	11
2.1.4 Puissance prévue d'une éolienne	12
2.1.5 Puissance réelle d'une éolienne	14
2.2 Mesures dans des conditions climatiques nordiques	14
2.2.1 Vent : vitesse et direction	14
2.2.2 Densité	17
2.3 Théorie des précipitations/accrétions	17
2.3.1 Description des précipitations et du givrage atmosphérique	18
2.3.2 Théorie des accrétions	20
2.3.3 Mesure du givrage	24
2.4 Effets des précipitations sur la performance	26
2.4.1 Données opérationnelles	26
2.4.2 Modélisation expérimentale	32
 CHAPITRE 3 DESCRIPTION DES DONNÉES	 35
3.1 Parc éolien <i>Le Nordais</i>	35
3.1.1 Les éoliennes	36
3.1.2 Angles de calage des éoliennes	36
3.2 Description des données	36
3.2.1 Données météorologiques (<i>EC</i>)	37
3.2.2 Tours de référence (<i>REF</i>)	38
3.2.3 Système de mesures des éoliennes (<i>EOL</i>)	44
 CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE	 49
4.1 Concepts fondamentaux	49
4.2 Identification des périodes de givrage	50
4.2.1 Données historiques et informations visuelles (<i>DHVIS</i>)	51
4.2.2 Température et humidité (<i>DRHT</i>)	51
4.2.3 Précipitation liquide par temps froid (<i>DPL</i>)	52
4.2.4 Comparaison entre un anémomètre chauffé et non chauffé (<i>DACNC</i>)	52

4.2.5	Lecture erronée sur un anémomètre/girouette non chauffé (DAE)	55
4.2.6	Puissance inférieure à la normale (DPIP)	55
4.2.7	Codes d'erreur de l'éolienne (DCE)	57
4.3	Caractérisation des événements de givre	57
4.4	Identification des impacts	57
4.5	Construction des courbes de puissance	58
4.5.1	Site de mesure	59
4.5.2	Équipement de mesure	60
4.5.3	Construction de la courbe de puissance normale	60
4.5.4	Normalisation de la puissance en fonction de l'angle de calage	61
CHAPITRE 5 CARACTÉRISATION DU CLIMAT		63
5.1	Température	63
5.2	Direction des vents	66
5.3	Vitesse des vents	66
CHAPITRE 6 IDENTIFICATION DES ÉVÉNEMENTS DE GIVRE		70
6.1	Phénomènes givrants potentiels	70
6.1.1	Données historiques et informations visuelles (DHVIS)	70
6.1.2	Température et humidité (DRHT)	75
6.1.3	Précipitation liquide par temps froid (DPL)	78
6.1.4	Codes d'erreur de l'éolienne (DCE)	78
6.1.5	Comparaison entre un anémomètre chauffé et non chauffé (DACNC)	81
6.1.6	Lecture erronée sur un anémomètre/girouette non chauffé (DAE)	84
6.1.7	Puissance inférieure à la normale (DPIP)	87
6.2	Identification et caractérisation des phénomènes givrants	90
CHAPITRE 7 ÉVALUATION DES PERTES DE PERFORMANCE		99
7.1	Courbe de puissance	99
7.2	Pertes de performance	102
7.3	Validité du calcul de pertes de performance	107
CHAPITRE 8 DISCUSSION ET ANALYSE DES RÉSULTATS		110
8.1	Pertes de performance	110
8.1.1	Coûts des pertes	111
8.1.2	Comparaison des résultats	112
8.1.3	Discussion sur les éoliennes à vitesse et pas variables	113
8.2	Techniques de détection du givre	114
8.2.1	Données historiques et inspections visuelles (DHVIS)	114
8.2.2	Température et humidité relative (DRHT)	114
8.2.3	Comparaison entre un anémomètre chauffé et non chauffé (DACNC)	116
8.2.4	Comportement erroné d'un anémomètre ou d'une girouette (DAE)	117
8.2.5	Puissance inférieure à la puissance prédite (DPIP)	119
8.2.6	Code d'erreur de l'éolienne (DCE)	121
CHAPITRE 9 CONCLUSION		122

ANNEXE I COORDONNÉES ET NUMÉROTATION DES ÉOLIENNES.....	124
ANNEXE II SPÉCIFICATIONS DE L'ÉOLIENNE <i>NEG MICON 750 KW</i>	129
ANNEXE III ANGLE DE CALAGE DES ÉOLIENNES.....	132
ANNEXE IV ENTÊTES DES FICHIERS DE DONNÉES.....	133
ANNEXE V SECTEURS DE VALIDITÉ DES MESURES	137
ANNEXE VI COMPARAISONS DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES	141
LISTE DE RÉFÉRENCES	143

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 2.1	Paramètres de lissage	23
Tableau 2.2	Données moyennes pour averses de neige	24
Tableau 3.1	Instruments et positions des instruments	39
Tableau 3.2	Paramètre de calibration des anémomètres des tours de référence ..	39
Tableau 3.3	Paramètre de calibration des anémomètres des éoliennes de référence	40
Tableau 3.4	Pannes des instruments de mesure	42
Tableau 3.5	Disponibilité des mesures des tours de références	43
Tableau 3.6	Valeur possible pour le champ <i>Generator online</i>	46
Tableau 3.7	Valeur possible pour le champ <i>Error Code</i>	46
Tableau 3.8	Disponibilité des mesures des éoliennes de références	48
Tableau 4.1	Impact des événements de givre	58
Tableau 6.1	Moyenne des paramètres météorologiques (Mont-Joli, 2000-2003)...	70
Tableau 6.2	Événements de pluie verglaçante (Mont-Joli, 2000-2003).....	71
Tableau 6.3	Moyenne des paramètres météorologiques (Mont-Joli, 2000-2003)...	73
Tableau 6.4	Événements brouillard givrant (Mont-Joli, 2000-2003)	73
Tableau 6.5	Durée (heures) des événements <i>DRHT</i>	75
Tableau 6.6	Conditions moyennes des événements <i>DRHT</i>	76
Tableau 6.7	Fréquence des codes d'erreur des turbines de références (occurrences).....	78
Tableau 6.8	Fréquence des codes d'erreur des turbines (occurrences).....	79
Tableau 6.9	Fréquence (heures) des mesures de vitesses suspectes.....	81
Tableau 6.10	Fréquence (heures) des données suspectes (DAE).....	84

Tableau 6.11	Durée (heures) des événements DPIIP.....	87
Tableau 6.12	Événements de givre réels (site de Matane)	91
Tableau 6.13	Commentaires sur les événements de givre réels (site de Matane) ...	92
Tableau 6.14	Événements de givre réels (site de Cap-Chat).....	93
Tableau 6.15	Commentaires sur les événements de givre réels (site de Cap-Chat)	94
Tableau 6.16	Types et impacts des événements de givre	96
Tableau 7.1	Perte de performances absolues, site de Matane	103
Tableau 7.2	Perte de performances absolues, site de Cap-Chat.....	104
Tableau 7.3	Perte de performances corrigées, site de Matane.....	105
Tableau 7.4	Perte de performances corrigées, site de Cap-Chat.....	106
Tableau 7.5	Variation de puissance par rapport à la courbe normale	108
Tableau 7.6	Probabilité des écarts considérables.....	109
Tableau 8.1	Fréquence d'identification - DRHT	115
Tableau 8.2	Fréquence d'identification (6h) - DRHT.....	115
Tableau 8.3	Fréquence d'identification - DACNC.....	117
Tableau 8.4	Fréquence d'identification - DAE.....	118
Tableau 8.5	Fréquence d'identification (1) - DPIIP.....	119
Tableau 8.6	Fréquence d'identification (2) - DPIIP.....	120
Tableau 8.7	Fréquence d'identification (3) - DPIIP.....	120

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Capacité éolienne mondiale [3].	2
Figure 1.2	Puissance éolienne installée au Canada [4].	2
Figure 1.3	Éoliennes en climat nordique [6] [7].	4
Figure 1.4	Givrage d'une éolienne [8].	5
Figure 2.1	Schéma du disque actuateur.	11
Figure 2.2	Diagramme des forces sur une pale.	12
Figure 2.3	Accrétion de glace en régime sec et en régime humide.	20
Figure 2.4	Courbe de performance de l'éolienne avec et sans givrage [35].	27
Figure 2.5	Puissance mesurée sur deux éoliennes rapprochées [35].	27
Figure 2.6	Puissance produite par l'éolienne avec et sans givrage [38].	28
Figure 2.7	Nombre de jours de givrage sur le site d'Acqua Spruzza [38].	29
Figure 2.8	Courbe de puissance d'une éolienne pendant les événements de givre [38].	30
Figure 2.9	Fréquence des événements de givre [39].	31
Figure 2.10	Répartition des impacts du givre sur les éoliennes [39].	32
Figure 2.11	Forme des accrétions sur le profil étudié [40].	33
Figure 2.12	Courbes de puissance de l'éolienne [40].	33
Figure 2.13	Perte de portance et augmentation de la traînée sur un profil NACA 63-415 [41].	34

Figure 3.1	Emplacement des sites et des éoliennes.	35
Figure 3.2	Exemple de décalage entre les systèmes d'acquisition (Matane, 2000).	44
Figure 3.3	Instruments de mesure sur l'éolienne [42].	45
Figure 4.1	Différentes phases d'un événement de givre.	50
Figure 4.2	Corrélation entre les vitesses (Matane, juillet 2000, 270°).	53
Figure 4.3	Analyse des différences entre deux anémomètres.	54
Figure 4.4	Identification des données suspectes selon la dispersion.	56
Figure 4.5	Identification visuelle des données suspectes.	56
Figure 4.6	Normalisation selon l'angle de calage.	62
Figure 5.1	Variation de la température mensuelle (Matane).	64
Figure 5.2	Température mensuelle moyenne 2000-2003 (Matane).	64
Figure 5.3	Variation de la température mensuelle (Cap-Chat).	65
Figure 5.4	Température mensuelle moyenne 2000-2003 (Cap-Chat).	65
Figure 5.5	Roses des vents, Matane (gauche) et Cap-Chat (droite).	66
Figure 5.6	Distribution et courbe de Weibull pour le site de Matane.	67
Figure 5.7	Distribution et courbe de Weibull pour le site de Cap-Chat.	68
Figure 6.1	Comparaison des paramètres météorologiques durant les épisodes de pluie verglaçante.	72
Figure 6.2	Comparaison des paramètres météorologiques durant les épisodes de brouillard givrant.	74
Figure 6.3	Conditions propices au givrage selon la direction.	77

Figure 6.4	Conditions propices au givrage selon la direction, Cap-Chat.	77
Figure 6.5	Distribution des codes d'erreur selon la période.....	80
Figure 6.6	Distribution selon la direction, Matane et Cap-Chat.....	80
Figure 6.7	Distribution des valeurs DACNC (en fonction de la direction).....	82
Figure 6.8	Distribution des valeurs DACNC (en fonction de la température).	83
Figure 6.9	Distribution selon la température, Matane (haut) et Cap-Chat (bas). 85	
Figure 6.10	Distribution selon la direction.	86
Figure 6.11	Distribution des valeurs DPIP (en fonction de la température).	88
Figure 6.12	Distribution des valeurs DPIP (en fonction de la direction)	89
Figure 6.13	Distribution de la température.	97
Figure 6.14	Distribution de l'humidité relative.....	97
Figure 6.15	Distribution de la vitesse.	98
Figure 6.16	Distribution selon la direction, Matane et Cap-Chat.....	98
Figure 7.1	Couple vitesse-puissance, Matane, 2000.....	99
Figure 7.2	Courbes de puissance normales, Matane.	100
Figure 7.3	Courbes de puissance normales, Cap-Chat.....	100
Figure 7.4	Courbes de puissances normales et direction, Matane, 2003.	101

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

À moins d'avis contraire, les unités du système international sont utilisées dans ce mémoire.

<i>A</i>	Aire balayée par le rotor de l'éolienne
<i>a</i>	Facteur d'induction axiale de l'éolienne
<i>a'</i>	Facteur d'induction angulaire de l'éolienne
<i>B</i>	Nombre de pales de l'éolienne
<i>C_{cal}</i>	Paramètre de calibration de l'anémomètre de la turbine
<i>C_{prog}</i>	Paramètre de calibration programmé de l'anémomètre de la turbine
<i>C_D</i>	Coefficient de traînée
<i>C_L</i>	Coefficient de portance
<i>C_p</i>	Coefficient de performance de l'éolienne
<i>c</i>	Corde de la pale
<i>DACNC</i>	Données – Anémomètre chauffé, non chauffé
<i>D_{cal}</i>	Paramètre de calibration de l'anémomètre de la turbine
<i>D_{prog}</i>	Paramètre de calibration programmé de l'anémomètre de la turbine
<i>DCE</i>	Données – Codes d'erreur de l'éolienne
<i>DEA</i>	Données – Lecture erronée sur un anémomètre non chauffé
<i>DHVIS</i>	Données – Historique et informations visuelles
<i>D_n</i>	Diamètre nominal de l'éolienne
<i>DPIP</i>	Données – Puissance inférieure à la puissance prévisible
<i>DPL</i>	Données – Pluie liquide
<i>DRHT</i>	Données – Humidité relative, température
<i>F</i>	Coefficient de perte de puissance dû à l'effet des bouts de pales
<i>F_D</i>	Force de traînée
<i>F_L</i>	Force de portance

F_N	Force normale
F_T	Force tangentielle
hr	Humidité relative
LWC	Teneur en eau liquide
L_n	Distance nominale des obstacles
MVD	Diamètre moyen des gouttelettes
P	Puissance produite par l'éolienne
P_{aero}	Perte de puissance aérodynamique
$P_{arrêt}$	Perte de puissance due aux arrêts
P_{givre}	Puissance produite dans un événement de givre
$P_{normale}$	Puissance produite dans des conditions normales
p	Pression atmosphérique
p_w	Pression de vapeur
R	Rayon de l'éolienne
R_{gaz}	Constante des gaz parfaits
R_w	Constante des gaz de la vapeur d'eau
r	Position radiale sur la pale
r_{max}	Diamètre maximal des gouttelettes d'eau (μm)
U	Vitesse du vent
V_{ts}	Vitesse corrigée enregistrée à l'éolienne
V_{nac}	Vitesse réelle lue par l'anémomètre à l'éolienne
U_{ref}	Vitesse relative de l'écoulement d'air
z	Altitude
α	Somme des efficacités mécaniques
α_1	Facteur de collection
α_2	Facteur d'adhésion

α_3	Facteur d'accrétion
ϕ	Somme des efficacités mécaniques
η	Somme des efficacités mécaniques et électriques
λ	Vitesse spécifique
λ_r	Ratio de vitesse locale
η	Somme des efficacités mécaniques
ρ	Densité de l'air
Ω	Vitesse de rotation de l'éolienne

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

La production d'énergie est l'une des activités les plus importantes au sein de tout État. Son influence sur les enjeux stratégiques, économiques et sociaux nous est constamment rappelée par les médias. En ce moment, l'utilisation de combustibles fossiles devance, et de loin, toute autre source d'énergie pour la production d'électricité [1]. On peut toutefois s'attendre à une augmentation de l'utilisation de nouvelles sources d'énergie, dites alternatives, vertes, écologiques, en raison de la diminution anticipée des réserves pétrolières jumelée à un réel désir de certains gouvernements de s'attaquer aux changements climatiques. L'énergie éolienne est l'une de ces sources d'énergie prometteuses.

1.1 Énergie éolienne : un bref aperçu

Le vent a longtemps été utilisé par l'homme. Les premières éoliennes seraient apparues en 900 AD en Perse. Leur évolution s'est poursuivie jusqu'au début de l'ère industrielle, où l'utilisation du charbon a éclipsé dramatiquement l'utilisation des éoliennes. Les éoliennes ont par la suite été utilisées sporadiquement jusqu'à la fin des années 60 où l'on peut parler d'une réémergence des éoliennes à des fins de production d'électricité [2].

On assiste depuis une dizaine d'années à une progression phénoménale de la production d'électricité par le biais de l'énergie éolienne. À travers le monde, la capacité de production est passée d'environ 5000 MW en 1995 à plus de 59 000 MW en 2005 [3]. Il existe aujourd'hui des parcs éoliens dans plus d'une vingtaine de pays. Cette augmentation apparaît sur la *Figure 1.1*.

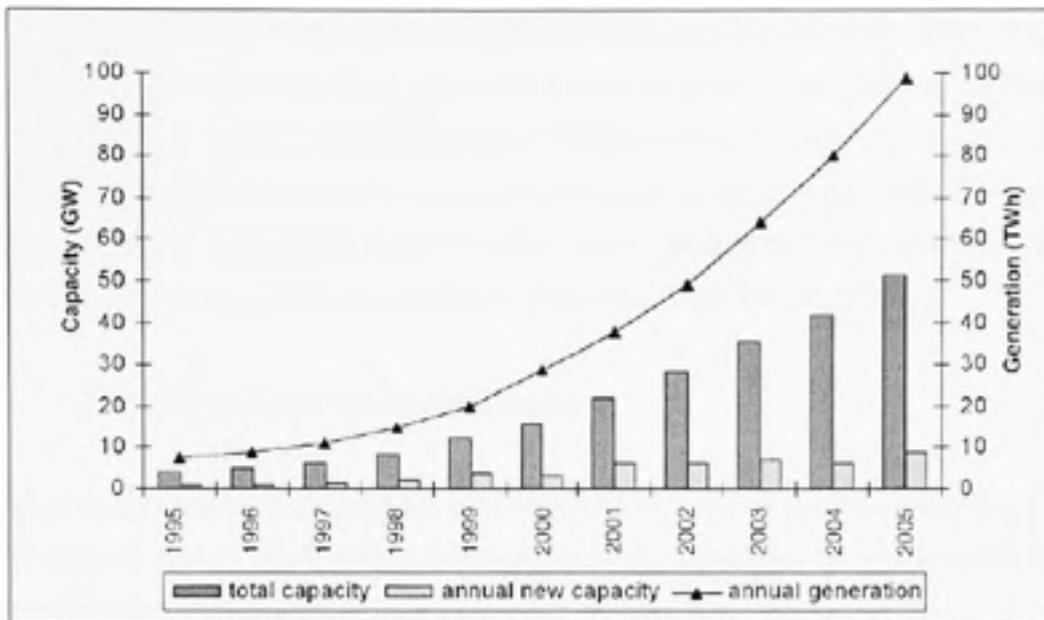


Figure 1.1 – Capacité éolienne mondiale [3].

Au Canada, la puissance installée est, à ce jour, d'environ 1450 MW, une augmentation de près de 1250 MW par rapport à l'an 2000. C'est en Ontario que l'on retrouve la plus grande puissance installée, 413 MW, suivie de l'Alberta, 384 MW, puis du Québec avec 322 MW [4]. La *Figure 2.1* présente la répartition de la puissance installée au Canada.



Figure 1.2 – Puissance éolienne installée au Canada [4].

Au Québec, on retrouve les projets de parcs éoliens à Cap-Chat (57 MW), à Matane (45 MW), à Rivière-aux-Renards (2 MW), à Murdochville (108 MW) et à Baie-des-Sables (110MW). Une grande période d'effervescence existe en ce moment puisqu'Hydro-Québec a octroyé de nouveaux contrats pour plus de 1000 MW en 2005, en plus de lancer un nouvel appel d'offres pour 2000 MW. Ces nouveaux projets porteront la puissance installée au Québec à plus de 3200 MW en 2014 [5].

1.2 Énergie éolienne en climat nordique

Toutes les installations québécoises, ainsi que plusieurs projets disséminés à travers le monde sont ou seront confrontés, au cours de leur exploitation, à des problématiques particulières liées au climat nordique.

1.2.1 Climat nordique

On entend généralement par climat nordique, un climat où les éoliennes peuvent être exploitées dans des températures situées à l'extérieur des limites d'opération d'une turbine standard ou au fait que les éoliennes puissent être exposées à des formes de givrage limitant la production [6]. L'installation et l'opération de turbines à des latitudes septentrionales ou à des altitudes élevées entraînent régulièrement des problématiques reliées au climat nordique.

C'est ainsi que l'on considère que certaines turbines installées au Canada, aux États-Unis, en Russie, en Chine, en Scandinavie (Suède, Norvège, Finlande, Danemark), ainsi que dans les Alpes (Allemagne, Autriche, Suisse) sont sujettes à des conditions nordiques. La puissance installée en climat nordique est appelée à augmenter rapidement. En effet, certaines conditions propres à ce climat sont propices à l'échafaudage de projets dans des climats nordiques : densité élevée de l'air froid et vitesse de vent élevée en altitude. On estime ainsi que 20 % des parcs éoliens pourraient être installés en climat nordique d'ici 2010 [6].

Dans le but d'étudier les problématiques liées à l'installation d'éoliennes dans des climats nordiques, de documenter ces installations, d'établir des recommandations et de proposer des solutions, l'*International Energy Agency R&D Wind* a mis sur pied un nouveau chapitre : *XIX Wind Energy in Cold Climate*.

1.2.2 Problématiques des éoliennes en climat nordique

L'opération d'éolienne en milieu nordique implique que certaines considérations particulières doivent être prises pour assurer le succès technique et la viabilité financière des projets. Jusqu'à tout récemment, il existait peu de données techniques et opérationnelles sur ces turbines. Toutefois, il existe de plus en plus d'information et de recommandations sur l'exploitation de parc éolien en climat nordique. La *Figure 1.3* et la *Figure 1.4* illustrent quelques-unes de ces problématiques.

L'accès peut être compliqué par le froid, la neige et la glace. L'entretien et la maintenance peuvent demander plus de temps qu'à l'ordinaire et peuvent même être impossibles dans certains cas. Les mesures de paramètres, telles la direction et la vitesse des vents, essentielles au bon fonctionnement de l'éolienne, ne sont pas simples dans des conditions climatiques extrêmes. Des instruments de mesure adaptés au froid sont requis, et même avec de tels instruments, les mesures peuvent parfois être douteuses [6] [7].



Figure 1.3 – Éoliennes en climat nordique [6] [7].

L'aérodynamique des turbines peut être grandement modifiée par le froid intense. Nous montrerons dans les sections suivantes que l'augmentation de la densité peut entraîner des problèmes de production. D'un autre côté, les précipitations verglaçantes et le givrage peuvent modifier l'écoulement de l'air sur les pales et ainsi modifier la performance de la turbine. Des effets mécaniques doivent également être prévus. L'accumulation de glace sur les structures peut compromettre leur intégrité. Cette même accumulation de glace sur les pales peut, quant à elle, causer des vibrations nuisibles. Il est également possible que les matériaux réagissent différemment par temps froid. Notons que la sécurité des travailleurs et autres usagers peut être compromise en cas de givrage des pales. Des morceaux de glace peuvent se détacher et atteindre des distances appréciables [6] [7] [8].



Figure 1.4 – Givrage d'une éolienne [8].

1.2.3 Technologies éoliennes adaptées au climat nordique

Dans le but de réduire les effets de ces conditions climatiques sur les éoliennes, de nombreuses technologies ont été adaptées ou développées. La conception même des éoliennes doit être adaptée au froid. On parle dans ce cas de matériaux de construction, tel que des aciers résistants au froid, de lubrifiants sélectionnés pour leurs

propriétés à basse température ainsi que de systèmes de chauffage pour les composantes critiques telles les boîtes de transmission.

En plus de ces technologies, de nombreux développements apparaissent dans la lutte au givrage. On peut séparer ces technologies en deux catégories. Premièrement, les technologies passives, dont le but est d'empêcher la formation de givre sur les pales. À l'heure actuelle, on étudie l'efficacité de revêtements spéciaux supposés freiner ou ralentir la formation de givre. Deuxièmement, les technologies actives, entrant en fonction lorsqu'il y a détection de glace. La plupart de ces technologies sont empruntées au monde de l'aviation : bord d'attaque chauffant et déformations mécaniques.

Il faut noter que toutes ces technologies n'ont pas pour effet de soustraire complètement les turbines aux effets d'un climat nordique. Actuellement, toutes les turbines installées en climat nordique continuent de voir leurs performances affectées par le froid et les précipitations [9].

1.3 Objectifs et plan du mémoire

Ces deux faits indiscutables, soient 1) le climat nordique influence grandement les performances de l'éolienne et 2) il y aura de plus en plus de parcs éoliens installés en climat nordique, motivent une exploration plus approfondie des paramètres influençant la performance des éoliennes installées en climat nordique. Nous chercherons, plus précisément, à quantifier les pertes de puissance dues à des phénomènes de givrage.

1.3.1 Problématique et objectif

On peut s'attendre à ce que les précipitations, par leur capacité à modifier l'écoulement autour d'un profil, modifient les performances des éoliennes. Afin d'analyser cette modification de la performance, il convient tout d'abord de décrire et de comprendre ces précipitations. On peut ensuite tenter de quantifier la durée et l'intensité de ces précipitations pour un site donné.

Le premier de ces éléments, la physique des précipitations, a été étudiée en détail et la documentation sur ce sujet est abondante. Le deuxième élément, la caractérisation des précipitations pour un site, a également été étudié pour plusieurs sites en climat nordique. On retrouve ainsi plusieurs données permettant de savoir si un site est sujet à des précipitations pouvant modifier sa performance [10] [11].

On retrouve toutefois beaucoup moins d'information fiable permettant de prédire avec précision la perte de performance associée à ces précipitations. Il existe pour certains sites des évaluations de la performance dans des conditions de givrage, mais ces évaluations sont pour la plupart des approximations. Des modèles mathématiques et des essais en soufflerie sont également disponibles, mais ces modèles quantifient la perte de portance d'un profil et extrapolent la perte de puissance pour une turbine, et ne mesurent pas les pertes de performance réelles.

Les objectifs de ce mémoire sont de quantifier, pour le parc éolien *Le Nordais*, les pertes de puissance associée aux diverses formes de givrage. Cette tâche d'analyse permet de faire le lien entre diverses conditions météorologiques et la performance mesurée sur l'éolienne.

La connaissance et la compréhension de l'impact des précipitations sur les performances de l'éolienne des sites québécois étudiés permettent de mieux prévoir le comportement des éoliennes, et d'assister les concepteurs et les opérateurs dans le choix de technologies adaptées au climat nordique.

1.3.2 Plan du mémoire

Afin d'atteindre les objectifs de ce mémoire et d'amener le lecteur à une compréhension claire des résultats, ce mémoire sera divisé de la façon suivante.

Le *chapitre 2* présente une revue des fondements théoriques sur lesquels s'appuie ce mémoire. Le lecteur retrouvera ainsi les notions de calcul de la performance d'une éolienne, la théorie relative à la mesure des conditions atmosphériques dans des

conditions climatiques nordiques ainsi que les éléments essentiels à la compréhension de la formation des précipitations et à leur accréation sur une surface. Le *chapitre 2* présente également une revue de la littérature des projets et études similaires et pertinentes.

Le *chapitre 3* fait une description géographique et technologique du site étudié en plus de décrire les données utilisées afin d'identifier les périodes de givre et de déterminer la performance des éoliennes. On y décrit, entre autres, la provenance des données. Le *chapitre 4* présente et explique la méthodologie permettant d'identifier les événements givrants et de quantifier la performance des éoliennes en climat nordique.

Le *chapitre 5* étudie certains paramètres météorologiques – température, vitesse et direction du vent – dans le but de décrire sommairement les conditions d'opération qui existent sur les deux sites. Le *chapitre 6* et le *chapitre 7* étudient la corrélation entre les événements givrants et les performances mesurées. On y retrouve la présentation détaillée des résultats.

Finalement, le *chapitre 8* présente au lecteur une discussion et une analyse de ces résultats. Le *chapitre 8* tente également de comparer les résultats expérimentaux obtenus avec d'autres méthodes de calcul de la performance tels les modèles mathématiques et les essais en soufflerie.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Avant de proposer une méthodologie permettant de quantifier les pertes de performance de l'éolienne, il convient de présenter la théorie et les études existantes sur lesquelles s'appuie ce mémoire. Il sera démontré que la puissance d'une éolienne est fonction de la vitesse du vent, de l'aire couverte par les pales, de la densité de l'air et finalement d'un coefficient de performance aérodynamique et mécanique. La puissance peut s'écrire ainsi :

$$P = f(U, A, \rho, C_p, \eta) \quad (2.1)$$

Les chapitres de la revue de la littérature présentent toutes les informations pertinentes à la compréhension de chacune des variables qui influencent la puissance de l'éolienne.

2.1 Théorie des éoliennes

Nous passons maintenant en revue des éléments de la théorie des éoliennes utiles au développement et à la compréhension du sujet étudié. Nous mettons l'emphase sur la mesure de la puissance puisqu'elle est au centre de nos préoccupations. L'objectif n'est pas de recopier toute la littérature, mais de présenter au lecteur les bases de notre analyse.

2.1.1 Types d'éoliennes

Au fil du temps, de nombreux modèles ou types d'éoliennes ont été conçus. L'objectif de cette recherche n'est pas d'énumérer et d'évaluer les qualités de chacun de ces modèles, le lecteur pourra se référer à Nelson [12] pour plus d'information, et se limitera aux éoliennes à axe horizontal. Ce concept s'est imposé comme le concept le

plus prometteur et représente aujourd'hui la presque totalité des éoliennes installées à travers le monde.

Il est impossible de faire une revue des techniques de construction ou des méthodes d'opération tant la liste est longue. Nous voulons seulement attirer l'attention du lecteur sur un élément de la technologie éolienne : le contrôle de la puissance de l'éolienne. Ce contrôle peut être exercé de façon aérodynamique à l'aide de deux techniques. Le contrôle par décrochage s'appuie sur la perte de portance d'un profil à des angles d'attaque importants. Dans ce cas, le pas de la pale est fixe. L'autre technique repose sur la variabilité du pas de la pale. En modifiant le pas de la pale, on modifie également l'angle d'attaque et donc la puissance produite.

Nous avons attiré l'attention du lecteur sur ce point, puisque l'impact du givrage sur l'éolienne sera vraisemblablement différent selon la technologie utilisée [6] [9]. On remarque également un impact de la température sur le comportement de l'éolienne. Dans certains cas, il y a eu surproduction sur des éoliennes utilisant le contrôle par décrochage [13].

2.1.2 Puissance du vent

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie cinétique du vent en mouvement et en électricité. On peut calculer la puissance maximale disponible dans le vent de la façon suivante. Le débit massique de l'air se déplaçant au travers du disque balayé par les pales est :

$$\frac{dm}{dt} = \rho AU \quad (2.2)$$

Nous obtenons ainsi la puissance qui est l'énergie cinétique par unité de temps :

$$P = \frac{1}{2} \rho AU^3 \quad (2.3)$$

Notons que ρ est la densité de l'air, A l'aire du rotor et U la vitesse du vent.

2.1.3 Puissance maximale d'une éolienne (Betz)

Dans la réalité, les éoliennes ne peuvent fournir une puissance équivalente à la puissance maximale disponible dans le vent. *Betz* [14] a démontré à l'aide d'un modèle simple (*Figure 2.1*)

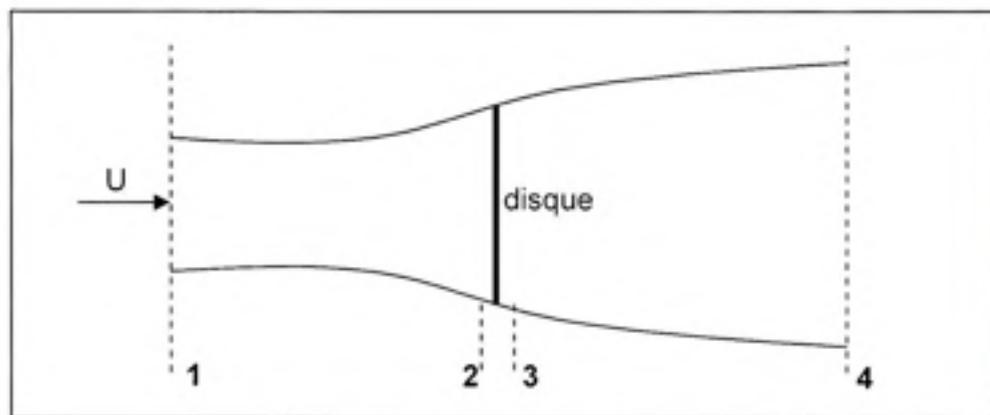


Figure 2.1 – Schéma du disque actuateur.

que la puissance pouvait être définie de la façon suivante :

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3 4a(1-a)^2 \quad (2.4)$$

La variable a représente le facteur d'induction axiale, défini comme étant le rapport entre la vitesse de l'écoulement libre et la vitesse au disque.

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad (2.5)$$

Le rapport de cette puissance sur la puissance maximale disponible dans le vent est défini comme le coefficient de performance.

$$C_p = \frac{\text{puissance_rotor}}{\text{puissance_vent}} = 4a(1-a)^2 \quad (2.6)$$

Ce coefficient est maximal lorsque la valeur de a est de $1/3$. Le coefficient est alors d'environ 0.5926. La limite de Betz est la valeur théorique maximale pour une éolienne avec les hypothèses suivantes :

- Écoulement en régime permanent avec un fluide incompressible;
- aucune traînée due à la friction;
- nombre infini de pales;
- force uniforme sur le disque actuateur;
- aucune rotation du sillage (*non rotating wake*).

Encore une fois, dans la réalité, ce coefficient C_p sera inférieur en raison de conditions qui ne respectent pas celles stipulées par Betz.

2.1.4 Puissance prévue d'une éolienne

Le coefficient de performance des éoliennes est affecté par les turbulences causées par la rotation des pales, par la traînée due à la friction et par des pertes en bout de pales. La *Figure 2.2* présente un profil et les forces qui s'appliquent sur ce profil.

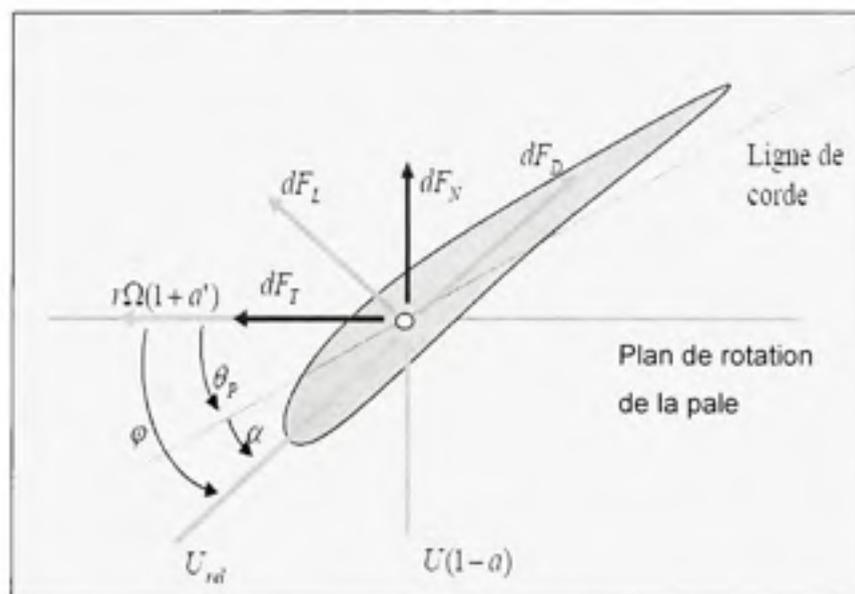


Figure 2.2 – Diagramme des forces sur une pale.

La puissance d'une éolienne est alors définie de la façon suivante [2] :

$$P = \int B\Omega r dF_T \quad (2.7)$$

où B est le nombre de pales, Ω est la vitesse de rotation et

$$dF_T = \frac{1}{2} \rho c U_{rel}^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) dr \quad (2.8)$$

Le coefficient de performance est obtenu à partir de la définition du coefficient de performance et de transformations algébriques. Il peut être calculé à l'aide de l'expression équivalente suivante [2]

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int \lambda_r a' (1 - a) d\lambda_r \quad (2.9)$$

où a est le facteur d'induction axial, a' est le facteur d'induction angulaire et λ et λ_r sont respectivement la vitesse spécifique en bout de pale et la vitesse spécifique locale.

Ces deux équations prennent en compte la perte de puissance associée à la rotation de l'écoulement et à la traînée sur les profils. Un autre facteur de correction peut être intégré dans l'équation 2.9 afin de tenir compte de la perte de puissance en bout de pales. Ce coefficient F , développé par Prandtl, est défini comme suit [2]:

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[\exp \left(- \left\{ \frac{(B/2[1 - (r/R)])}{(r/R) \sin \varphi} \right\} \right) \right] \quad (2.10)$$

Toutes ces équations permettent de prédire la puissance d'une éolienne et sont utiles lors de la conception des éoliennes. Ces relations ont été développées avec l'hypothèse que l'écoulement est en régime permanent. Des effets dus à des écoulements non permanents et à des écoulements turbulents modifient la performance des éoliennes.

2.1.5 Puissance réelle d'une éolienne

Les équations et relations présentées dans les *sections 2.1.2, 2.1.3 et 2.1.4* permettent de prédire les performances d'une éolienne en théorie et sont utiles pour la conception de l'éolienne. En pratique, la puissance de l'éolienne dépend de son coefficient de performance ainsi que d'un coefficient d'efficacité mécanique.

$$P = \frac{1}{2} C_p \eta \rho A U^3 \quad (2.11)$$

La variable η représente la somme des autres efficacités mécaniques et électriques.

Les courbes de puissance fournies par les manufacturiers tiennent compte de ces deux coefficients, mais sont mesurées expérimentalement. La norme *IEC 61400 Part 121 : Power performance measurements of grid connected wind turbines* est un document qui établit la marche à suivre pour évaluer la performance d'une éolienne [15].

2.2 Mesures dans des conditions climatiques nordiques

Si l'on observe la définition de la puissance du vent (équation 2.3), on remarque que la vitesse du vent et la densité de l'air influencent directement la puissance fournie par l'éolienne. On fera dans cette section un survol de la théorie du vent, de la densité de l'air et de la procédure pour les mesurer.

2.2.1 Vent : vitesse et direction

La vitesse du vent est l'un des paramètres essentiels liés au design de l'éolienne, à l'évaluation de la performance, au choix de l'emplacement d'un parc éolien et à l'opération du parc éolien. Le *chapitre 3* de la norme *IEC Wind Turbine Part 121 : Power performance measurements of grid connected wind turbines* établit la procédure pour mesurer la direction et la vitesse du vent.

2.2.1.1 Mesure de la vitesse en climat nordique

En présence de phénomènes de givrage, la mesure précise de la vitesse du vent se complique. L'adhésion de glace sur les anémomètres standard fausse les mesures dans un premier temps et peut mener jusqu'à l'immobilisation complète de l'appareil.

Il est essentiel d'utiliser des anémomètres conçus pour résister au givrage de ses composantes. Il est étonnant de constater que jusqu'à tout récemment, il existait peu d'anémomètres utilisables dans des conditions de givres et que leur comportement avait été peu étudié.

Il n'existe aujourd'hui aucune norme décrivant la méthodologie permettant de mesurer de façon précise la vitesse du vent dans des conditions de givrage, ce qui explique peut-être la grande quantité d'anémomètres antigivre (*ice-free*) censés fonctionner dans des conditions de givre. On retrouve principalement trois principes de fonctionnement pour les anémomètres antigivre : rotationnel (à coupoles), mesure de la pression et ultrasonique. Tous ces anémomètres sont chauffés pour prévenir les accrétions de glace.

Il a été démontré que le comportement de ces anémomètres est extrêmement variable et que les mesures de vitesse sont différentes d'un appareil à l'autre. Dans une étude récente, Tammelin [16] a étudié les corrélations entre une vingtaine d'anémomètres. Il démontre cette variabilité et arrive à la conclusion que les appareils antigivre ne le sont généralement pas complètement. Ses conclusions quant à la fiabilité des anémomètres sont accompagnées d'une remarque importante : le choix d'un anémomètre dépend de l'application désirée et de la situation géographique. L'importance de ce dernier point est mise en évidence par une étude similaire réalisée par la *Federal Aviation Administration* américaine [17] qui arrive à des conclusions complètement opposées quant à la fiabilité de certains anémomètres.

Le choix d'un anémomètre se fera donc en attachant une grande importance au site de mesure et à la connaissance du comportement opérationnel de l'anémomètre.

Peu importe le choix de l'anémomètre, ce dernier devra être calibré convenablement. Il a été démontré que la calibration effectuée par le fabricant est parfois erronée et que par conséquent l'anémomètre ne mesure pas convenablement la vitesse du vent sur le terrain [18]. Le même résultat est obtenu pour des anémomètres antigivre [19]. La *norme IEC* présente la marche à suivre pour réaliser la calibration d'un anémomètre à coupole. Il s'agit, dans cette norme, d'une calibration sans phénomène de givrage.

Il est illusoire de croire qu'un anémomètre antigivre se comportera de la même façon dans des conditions normales et lorsque soumis à des conditions givrantes. Selon des études de Fortin [20] et de Kimura [21], il est démontré que le comportement de l'anémomètre *Ice-Free NRG*, et plus généralement des anémomètres à coupoles, se détériore en fonction de la sévérité de l'événement de givrage.

Encore une fois, la mesure de la vitesse du vent pendant un événement de givre est complexe et demeure un champ de recherche en progression. Une attention particulière doit être prêtée à la provenance des données. L'exactitude des mesures dépendra de la connaissance du site et du comportement de l'anémomètre.

2.2.1.2 Correction de la vitesse du vent en fonction de l'altitude

Dans bien des cas, la vitesse sera mesurée à une hauteur différente de la hauteur de la nacelle. Le comportement de la vitesse du vent est relativement connu et il est possible d'extrapoler pour une hauteur différente. Dans son expression la plus simple, la vitesse du vent en fonction de l'altitude est :

$$\frac{u_2}{u_1} = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^p \quad (2.12)$$

Où p est un facteur qui tient compte de la nature du sol, de la hauteur et de la stabilité de la couche limite atmosphérique. Il faut noter que cette expression de la vitesse du vent est valide pour les premiers 100 mètres de la couche atmosphérique et pour des types de sol homogène (plat) dans la direction du vent [22].

2.2.2 Densité

On peut estimer la densité de l'air à partir des mesures de la température et de la pression. Pour de l'air sec, et en supposant que l'air est un gaz parfait, la densité est exprimée à l'aide de l'expression suivante :

$$\rho = \frac{p}{R_{\text{gaz}} T} \quad (2.13)$$

Pour des valeurs élevées de température, il est possible de corriger la valeur de la densité afin de tenir compte de l'humidité de l'air.

$$\rho = \frac{1}{T} \left(\frac{p}{R_{\text{gaz}}} - h_r \times p_w \left(\frac{1}{R_{\text{gaz}}} - \frac{1}{R_w} \right) \right) \quad (2.14)$$

L'expression suivante permet de corriger la valeur de la pression et donc la densité en fonction de l'altitude [2].

$$p = 101.29 - 0.011837z + 4.793 \times 10^{-7} z^2 \quad (2.15)$$

2.3 Théorie des précipitations/accrétions

De la même façon, si l'on regarde les équations qui prédisent la puissance des éoliennes, on remarque que, outre la vitesse du vent, le coefficient de traînée (C_D) et le coefficient de portance (C_l) ont une influence sur la puissance. On peut supposer que les précipitations, particulièrement celles qui adhèrent au profil, vont modifier ce profil et en augmenter le coefficient de traînée et diminuer le coefficient de portance.

Nous ferons dans cette section, une revue de la théorie et de la littérature des précipitations et des accrétions. Cette revue s'impose du fait que les précipitations et les accrétions sur un profil sont au cœur même de notre étude.

2.3.1 Description des précipitations et du givrage atmosphérique

Avant d'étudier la mécanique de la formation de la glace sur un profil ainsi que les effets de ces accrétions sur la performance, il convient de caractériser les précipitations et phénomènes météorologiques pouvant affecter l'éolienne. Il existe premièrement, des précipitations (*neige, pluie*) qui n'adhèrent pas au profil, mais qui pourraient néanmoins modifier l'écoulement de l'air. Ces mêmes précipitations, peuvent dans certaines conditions (*neige mouillée, pluie verglaçante*) adhérer au profil et en modifier la forme et les coefficients de traînée (C_D) et de portance (C_L). Finalement, il convient de caractériser des phénomènes météorologiques (*givrage atmosphérique, givre*) qui peuvent se former sur le profil et en modifier les propriétés aérodynamiques.

2.3.1.1 Pluie et neige sans accrétion

La pluie est formée lorsque la vapeur d'eau se condense autour d'un noyau de condensation et prend alors la forme d'une goutte. En fonction des courants ascendants et descendants, la masse de cette goutte augmente jusqu'à retomber vers la terre. La neige, quant à elle, est formée lorsque la vapeur d'eau contenue dans un nuage, sous l'effet de température basse, se condense directement sous forme de glace autour d'un noyau solide. Les flocons de neige dendritiques sont le résultat d'une agglutination de cristaux de glace et leur forme dépendra des paramètres de la chute du flocon.

Nous négligerons dans ce mémoire l'influence des précipitations de neige et de pluie sur la performance, bien que l'impact de la pluie sur la performance ait été observé dans certains cas [23].

2.3.1.2 Verglas (glaze, clear ice, blue ice)

Lorsque la pluie tombe et entre en contact avec une surface située sous le point de congélation, elle forme du verglas. Cette situation peut apparaître lorsqu'une masse

d'air froid est emprisonnée sous une masse d'air chaud ou lors de changement de température brusque [24] [25].

2.3.1.3 Neige mouillée (*wet snow, sleet*)

Les précipitations peuvent parfois prendre la forme d'une agglomération de flocons et sont alors un mélange de flocons, d'eau et d'air. Dans certaines conditions particulières de température et de vitesse de vent, la neige mouillée a un haut coefficient d'adhésion aux structures [24] [25].

2.3.1.4 Givrage atmosphérique (*rime ice, in-cloud icing*)

Le givrage atmosphérique est formé lorsque des gouttelettes d'eau surfondues entrent en contact avec une surface dont la température est sous le point de congélation. Ces gouttes surfondues gèlent alors au moment de l'impact. Les dimensions et la température de ces gouttelettes détermineront le type d'accrétion.

Dans le cas où la totalité des gouttelettes se solidifie au contact de la surface, c'est-à-dire qu'il n'y pas d'eau à la surface, on assiste à la formation de givre. La glace formée est de couleur blanche et est moins dense que le verglas. On parlera de givre léger (*soft rime*) lorsque le diamètre des gouttelettes est petit et le contenu d'eau liquide (*LWC*) est peu élevé. Si le diamètre et le contenu en eau liquide augmentent, la glace formée sera plus dense (*hard rime*). Le régime de formation du givre est appelé régime sec.

En régime humide, la totalité des gouttelettes surfondues ne gèle pas au contact de la surface. Les gouttelettes d'eau qui demeurent à la surface vont s'associer et croître pour former des gouttes d'eau. Ces gouttes pourront geler en formant du givre ou s'écouler pour former un film. Ce film gèle sous la forme de verglas [24] [25].

La *Figure 2.3* suivante illustre l'apparence caractéristique des deux régimes d'accrétion.



Figure 2.3 – Accrétion de glace en régime sec et en régime humide.

2.3.1.5 Givre (frost)

Le givre se forme lorsque la température d'une surface s'abaisse sous le point de congélation tout en étant en dessous du point de rosée d'une masse d'air. La vapeur se dépose en une mince couche de cristaux de glace sur la surface, phénomène que l'on observe parfois le matin sur le sol ou les vitres des voitures.

2.3.2 Théorie des accrétions

Nous avons décrit, de façon générale, les types d'accrétions possibles à la section précédente. Il convient d'apporter un supplément d'information sur la physique de ces accrétions, car sans une caractérisation précise, il devient difficile de comprendre pleinement les phénomènes de perte de puissance associée aux phénomènes givrants et de développer des modèles mathématiques. Cette théorie a été étudiée en profondeur et nous invitons le lecteur, à se référer aux publications précédemment citées [24] [25].

Le givrage atmosphérique et les précipitations verglaçantes sont décrits par leur teneur en eau liquide (*LWC*) et par le spectre du diamètre des gouttelettes surfondues. Ce dernier paramètre peut être obtenu à l'aide de mesures radars de polarimétrie. Cette mesure étant relativement complexe, le diamètre médian des gouttelettes (*MVD*) est

généralement utilisé. Selon la nature de l'accrétion, ces paramètres seront déterminés de différentes façons, et il en sera question dans les sections suivantes.

Toujours dans le but de caractériser l'accrétion de glace, il convient de déterminer la masse et la forme de la glace qui se formera sur l'objet étudié. La forme de la glace sur l'objet peut être obtenue à l'aide d'expérimentations ou de simulations numériques. La masse de glace se formant sur un objet peut être exprimée à l'aide de l'expression suivante :

$$m = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \times LWC \times U_{rel} \times aire \times t \quad (2.16)$$

où les trois paramètres α_1 , α_2 et α_3 sont des facteurs de correction. Le premier de ces facteurs correspond au *facteur de collection* et représente le ratio de particule frappant la surface par rapport au maximum possible. En effet, on peut s'attendre à ce que des particules légères soient déviées avant même d'atteindre la surface de la pale. Le second de ces paramètres correspond au *facteur d'adhésion* et est décrit par le ratio entre les particules qui adhèrent à la pale sur le nombre de particules ayant touché la pale. Le dernier de ces paramètres est le *facteur d'accrétion* et permet de décrire le régime d'accrétion : sec, mixte et humide.

De nombreuses études ont porté sur la détermination de ces facteurs. L'étude exhaustive de ces facteurs dépasse le cadre de ce mémoire. Il existe toutefois un certain nombre de relations empiriques ayant été développé dans le but de simplifier la théorie et s'appliquant particulièrement bien à l'analyse opérationnelle. Nous présentons ces relations dans les sections suivantes.

2.3.2.1 Givrage atmosphérique

Dans le cas des brouillards givrants, le spectre du diamètre des gouttelettes a été analysé et les relations suivantes ont été déduites [25]. La teneur en eau (*LWC*) peut être exprimée ainsi :

$$LWC = A_{Best} \times r_{max}^p \quad (2.17)$$

Les valeurs recommandées par Best pour A_{Best} et p sont respectivement de 0.0011 et 1.79. Le diamètre maximum des gouttelettes (r_{max}) est obtenu à partir du spectre des diamètres de gouttelettes [25].

Il existe plusieurs relations empiriques permettant de prédire l'intensité du phénomène givrant. La plus simple [26] dépend uniquement de la vitesse du vent et s'exprime ainsi :

$$\frac{dm}{dt} = 4.8 \times 10^{-3} \times U \quad (2.18)$$

Notons toutefois, que l'utilisation de cette formule empirique conduit à des résultats fortement différents des résultats mesurés dans une étude récente [27].

2.3.2.2 Verglas

Dans le cas de la pluie verglaçante, la teneur en eau liquide peut être exprimée en fonction de l'intensité de précipitation (P_{pluie}) :

$$LWC = C \times P_{pluie}^f \quad (2.19)$$

La valeur du diamètre moyen des gouttelettes peut s'exprimer de la façon suivante :

$$MVD = 0.69^{\left(\frac{1}{n}\right)} \times \alpha \times P_{pluie}^p \quad (2.20)$$

Les paramètres de ces équations peuvent prendre plusieurs valeurs selon la littérature. Le *Tableau 2.1* présente quelques valeurs possibles.

Tableau 2.1

Paramètres de lissage [25]

	n	α	β	C	f
Best (1949)	2.25	1.30	0.232	0.067	0.846
Best (1950)	2.29	1.56	0.209	0.059	0.816
Marshall-Palmer (1947) Pluie verglaçante	1.85	1.00	0.240	0.072	0.880
Marshall-Palmer (1948) Pluie continue		0.91	0.240	0.072	0.880
Marshall-Palmer Pluie continue légère				0.054	0.840
Marshall-Palmer Orage				0.089	0.840

L'intensité du givrage peut s'exprimer par une relation relativement simple :

$$\frac{dm}{dt} = LWC \times U \quad (2.21)$$

Encore une fois, il est nécessaire de rappeler que les relations empiriques tentent de décrire des phénomènes extrêmement complexes, et que la prudence est de mise.

2.3.2.3 Neige mouillée

La caractérisation des averses de neige est légèrement plus complexe. La teneur en eau liquide (LWC) dépend de l'intensité de la précipitation et de la vitesse terminale des flocons qui elle dépend des dimensions des flocons. Le *Tableau 2.2* présente quelques valeurs caractéristiques pour la neige.

Tableau 2.2

Données moyennes pour des averses de neige [25]

Intensité de précipitation (mm/hr)	Diamètre moyen fondu (mm)	Diamètre moyen maximum (mm)	Vitesse terminale (m/s)	Teneur en eau liquide (g/m ³)
0.5	1.18	8.4	1.034	0.134
1.0	1.53	11.6	1.103	0.252
1.5	1.71	13.3	1.134	0.367

Contrairement aux modèles d'accrétion de la glace, les modèles d'accrétion de la neige vont généralement mener à une mauvaise représentation de la réalité, car les mécanismes gouvernant les accrétions de neige mouillée demeurent mal connus. Les principaux modèles d'accrétion de neige mouillée s'appliquent à des collecteurs circulaires.

2.3.3 Mesure du givrage

La théorie présentée aux points précédents est relativement complexe et ne permet pas de mesurer les paramètres des accrétions de glace dans un environnement opérationnel. À l'instar de la mesure de la vitesse du vent dans des conditions de givrage, il n'existe aucune norme universelle utilisable pour détecter un événement de givre, pour en déterminer la durée ainsi que l'intensité. Plusieurs techniques ont été développées pour détecter et caractériser les événements givrants.

2.3.3.1 Givromètre

Malgré l'absence de standard au niveau de la détection de givre, de nombreux appareils de mesure ont été développés [28]. Plusieurs principes sont utilisés pour la détection de givre : modification de la fréquence de vibration d'une sonde, mesure du poids de la glace et atténuation d'un signal électrique. Le large éventail de technologies

proposées permet de constater qu'il n'y pas d'appareil parfait pour l'instant. Plusieurs études démontrent les limites de ces appareils [29] [30] [31].

L'avantage de ces appareils, malgré certaines lacunes, réside dans leur capacité à fournir des informations sur les paramètres de l'événement de givre (*MVD* et *LWC*). Dans un article de Fortin [32], on explique la méthodologie permettant de calculer ces paramètres à partir d'un givromètre fonctionnant selon le principe de l'atténuation de la vibration d'une sonde.

2.3.3.2 Anémomètre

L'impact du givre sur le fonctionnement d'un anémomètre non chauffé a été démontré à la *section 2.2*. La différence entre les vitesses lues par deux anémomètres, l'un chauffé et l'autre non, a été utilisée dans certains cas pour identifier des événements de givre [33]. Malgré les limitations de cette technique, il semble qu'il soit néanmoins possible d'obtenir des informations générales sur les événements de givre [30].

2.3.3.3 Humidité et température

Il a été suggéré par plusieurs [7] [29] d'utiliser la mesure de la température et de l'humidité pour identifier des événements de givre ou pour déterminer la probabilité de tels événements. Il est possible de démontrer qu'un événement de givre se produit presque toujours dans une plage de valeurs très spécifiques. Fortin définit la plage de ces valeurs pour des événements s'étant produits à Murdochville [32]. Il est beaucoup plus difficile d'effectuer l'opération inverse. À partir de données provenant du site de Luosto, Finlande, le *Finnish Meteorological Institute*, arrive à la conclusion que l'utilité de cet outil est faible dans un but de prédiction. Pour des conditions identiques de températures et d'humidité, il y a parfois présence de givrage et parfois non [30] [34].

2.4 Effets des précipitations sur la performance

La revue de la littérature permet, jusqu'ici, de prévoir une diminution de la performance de l'éolienne lors d'événements de givre. Cette diminution étant prévisible, il faut la mesurer. Un certain nombre d'études ont étudié l'impact du givrage sur la performance. La méthodologie employée varie énormément; dans certains cas, on privilégie l'analyse de données opérationnelles alors que dans d'autres cas on simule en soufflerie des conditions particulières de givrage. Finalement, il est également possible de mesurer la performance des éoliennes à l'aide de modèles numériques. Nous faisons ici la revue de quelques études intéressantes sur ce sujet.

2.4.1 Données opérationnelles

En raison de la complexité de la théorie des accrétions de glace, de nombreuses études ont analysé les données opérationnelles provenant de parcs éoliens fréquemment soumis à des phénomènes de givre. Nous présentons ici certaines études pertinentes et significatives.

2.4.1.1 Site : Searsburg, États-Unis

Ce parc éolien, d'une puissance de 6.05 MW, est situé dans la ville de Searsburg dans l'état du Vermont. Le parc contient 11 éoliennes *Zond Z-40*, de 550 kW, installées à une altitude variant de 823 mètres à 884 mètres. Les éoliennes ont été adaptées au climat nordique et possèdent, notamment, des pales noires dans le but de limiter la persistance des événements de givre.

Les trois rapports élaborés [35] [36] [37] par le département américain de l'énergie ne font pas une étude formelle de l'impact du givre sur la performance. On y retrouve plutôt, une suite d'observations sur des événements de givre s'étant produits. Le rapport soutient que les problèmes dus au givrage ont été fréquents durant la première année d'opération (1997-1998), mais pas durant les deux années subséquentes (1998-1999, 1999-2000).

On affirme, dans ces rapports, que le givre affecte la performance des éoliennes. Pour soutenir leurs affirmations, les auteurs nous présentent des courbes de puissance en fonction du temps pour une éolienne. On nous présente également, voir la *Figure 2.4*, les courbes de puissance de l'éolienne pour des mois où les phénomènes de givre sont fréquents (février) et presque absents (avril).

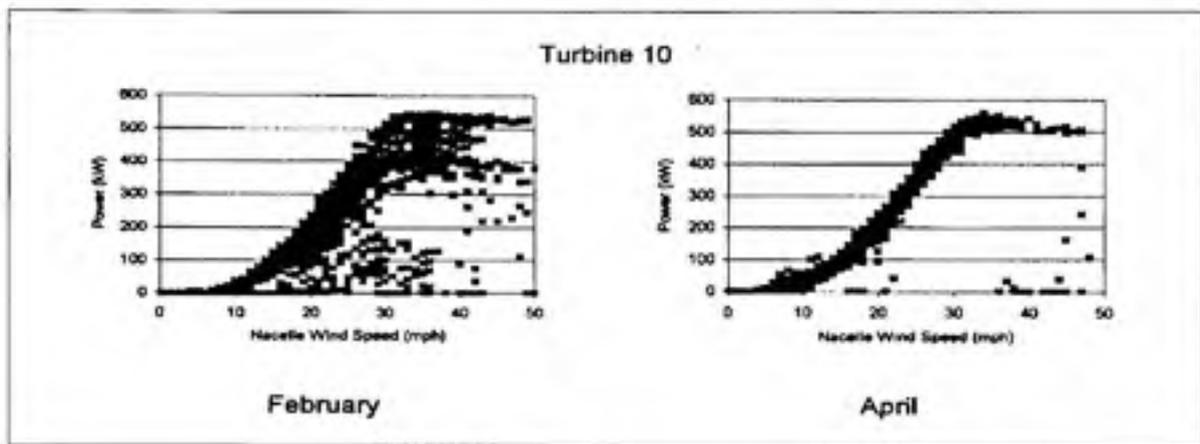


Figure 2.4 – Courbe de performance de l'éolienne avec et sans givrage [35].

Finalement, on observe sur la *Figure 2.5* que l'impact d'un événement de givre sur deux éoliennes rapprochées – moins de 200 mètres – peut être très différent.

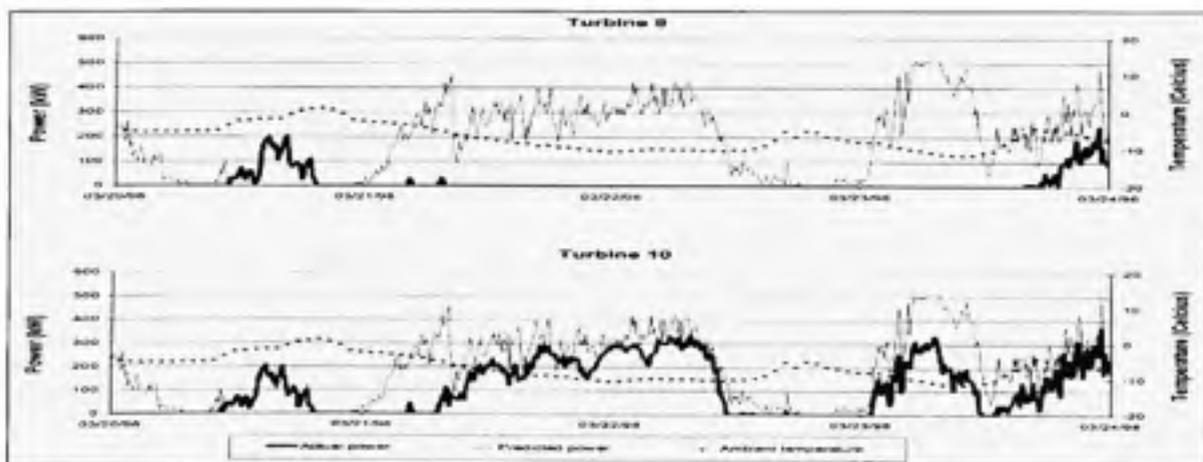


Figure 2.5 – Puissance mesurée sur deux éoliennes rapprochées [35].

À défaut de quantifier directement la perte de puissance due aux événements de givre, les auteurs soulignent que la perte de puissance varie entre 9 % et 14 % durant les mois d'hiver. Cette perte de puissance est attribuable au givre et à d'autres causes non identifiées.

2.4.1.2 Site : Acqua Spruzza, Italie

Ce parc éolien, d'une puissance de 2.44 MW, est situé dans les alpes italiennes. Il s'agit d'un site de test de la compagnie *ENEL* visant à évaluer la faisabilité de projets éoliens dans des conditions extrêmes. Les 8 éoliennes du site sont situées à une altitude approximative de 1350 mètres. Les éoliennes ne sont équipées d'aucun équipement adapté au givrage. Les tours de mesure possèdent des instruments chauffés.

Le rapport [38] identifie, entre autres, les conséquences d'un événement de givre. Les auteurs ont identifié des périodes où les instruments de mesure sont obstrués par la glace, des périodes où les instruments de mesure fournissent des mesures erronées en raison de la glace et des périodes où la performance aérodynamique est diminuée. Cette dernière situation est présentée à la *Figure 2.6*, mais ne représente pas la majorité des pertes de puissance de l'éolienne.

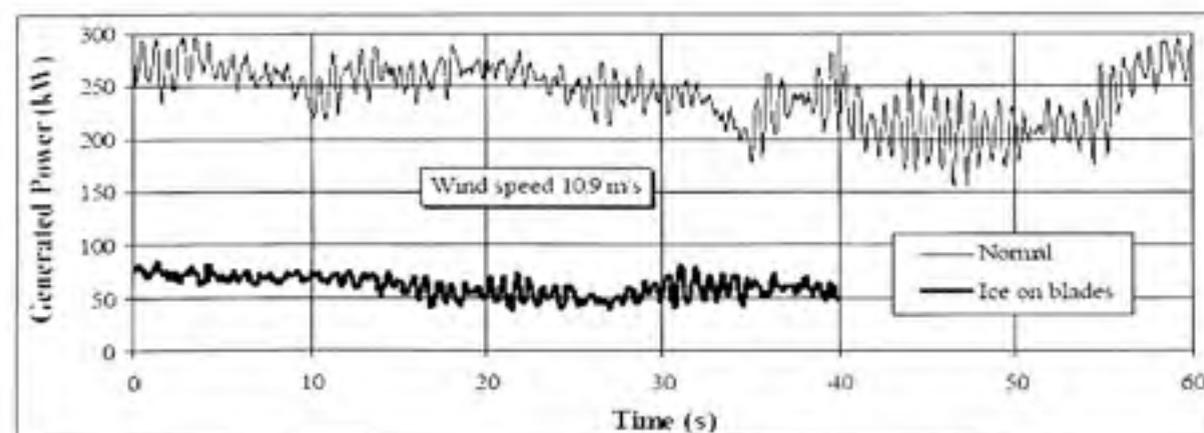


Figure 2.6 – Puissance produite par l'éolienne avec et sans givrage [38].

La diminution de la performance du site est estimée à 19 % de la puissance annuelle, pour les mois hivernaux, prévue en supposant que tous les événements de givre mènent à l'arrêt des éoliennes. Un givromètre a été utilisé pour détecter la durée des événements de givre. Dans ce rapport, on suppose que les accrétions de glace perdurent jusqu'à ce que les températures augmentent au-dessus du point de congélation. C'est ce temps de givrage qui est utilisé (voir *Figure 2.7*) dans l'évaluation de la perte de performance du site.

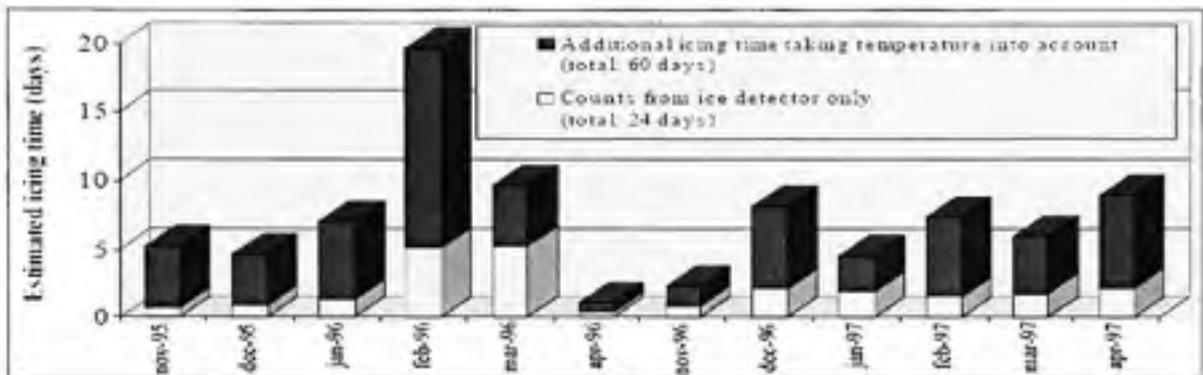


Figure 2.7 – Nombre de jours de givrage sur le site d'Acqua Spruzza [38].

Ce rapport a le mérite, à notre avis, d'identifier deux problématiques intéressantes. Premièrement, on tente de ségréguer les causes des pertes de puissances. Deuxièmement, on explore la difficulté d'identifier la durée réelle d'un événement de givre.

2.4.1.3 Site : Pori, Finlande

Ce parc éolien, d'une puissance de 8 MW, est situé dans le sud-ouest de la Finlande. Le parc contient 8 éoliennes *Bonus*, de 1 MW, installées à une altitude d'environ 100 mètres. Les éoliennes ont été adaptées au climat nordique et quatre d'entre elles possèdent, notamment, un système de dégivrage des pales.

Les auteurs ont utilisé trois techniques pour identifier les périodes de givre : un givromètre, une relation entre la température et l'humidité, et finalement la présence de

pluie dans des températures sous zéro. Un événement de givre se produit lorsque l'une ou plus de ces techniques identifient du givre. Dans le but de comparer la performance en temps normal et dans des conditions de givre, les courbes de puissance ont été juxtaposées. La *Figure 2.8* présente les courbes de puissance lors d'événement de givre.

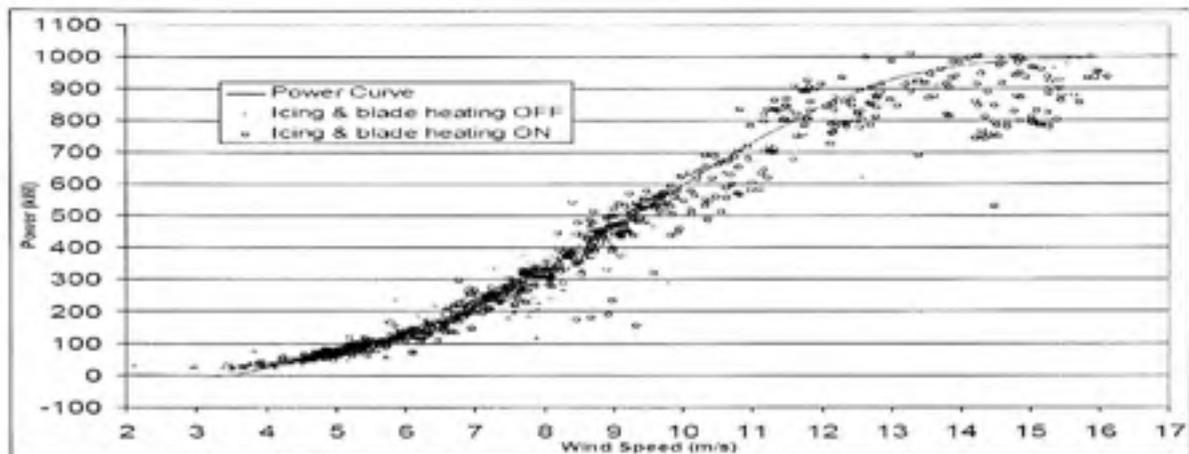


Figure 2.8 – Courbe de puissance d'une éolienne pendant les événements de givre [38].

Ce rapport conclut que le givrage peut conduire jusqu'à des pertes de puissance d'environ 7 % à 19 %. Ces valeurs incluent la puissance perdue nécessaire au fonctionnement du système de dégivrage des pales. Il est intéressant de noter que la pluie ne semble pas, selon ce rapport, affecter la performance lorsque la vitesse du vent est inférieure à 14.5 m/s. Encore une fois, il faut souligner la difficulté qu'ont eu les chercheurs à identifier précisément les événements de givre.

2.4.1.4 Site : 250MW Wind Program, Allemagne

Les études citées précédemment ont surtout tenté de caractériser les phénomènes de givre et, à l'aide de la courbe de puissance, d'évaluer les pertes de puissance de l'éolienne lorsqu'elle opère dans des conditions de givre.

Une étude réalisée sur les programmes éoliens en Allemagne [39] utilise une approche différente et apporte des éléments intéressants. Dans le cadre d'un programme de subvention, les opérateurs de parcs éoliens se voient obligés de transmettre une foule d'information dans un but de recherche. L'auteur du rapport analyse plus de 61000 rapports d'opérations, dont 960 rapports concernant le givrage.

Le rapport ne fournit pas de description exhaustive des événements de givre, mais décrit la fréquence des événements de givre. (Figure 2.9)

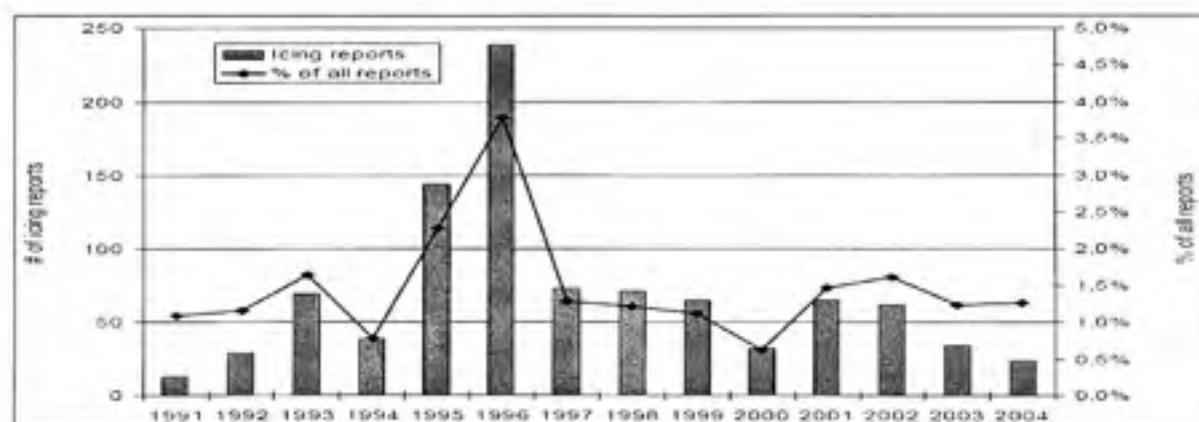


Figure 2.9 – Fréquence des événements de givre [39].

L'analyse de l'impact des événements de givre amène des résultats plus intéressants encore. Alors que plusieurs études ont été réalisées dans le but de décrire les pertes aérodynamiques – il en sera question à la section suivante – l'impact principal semble être l'arrêt complet de la turbine. La Figure 2.10 présente la répartition des impacts du givrage.

REPORTED EFFECT OR MALFUNCTION	FREQUENCY
plant stoppage	89%
reduced power output	13%
noise	2%
vibration	5%
overspeed	1%
overload	1%
causing follow up defects	1%
other consequences	4%

Figure 2.10 – Répartition des impacts du givre sur les éoliennes [39].

Bien que ces résultats proviennent de conditions climatiques variées et de l'utilisation de technologies différentes, il demeure que le rapport illustre un point peu étudié par les autres études.

2.4.2 Modélisation expérimentale

Il est parfois difficile, à partir d'analyse expérimentale, d'associer les pertes de puissance avec des événements de givre. Des essais en soufflerie sur un profil de pale permettent de contrôler les paramètres de l'événement de givre et d'en mesurer précisément l'influence sur le profil. On mesure ici la variation du coefficient de portance et de traînée du profil. On retrouve une quantité phénoménale d'études de ce genre reliée au givrage des ailes d'avions.

De plus, la théorie des accrétions permet maintenant, à l'aide d'outils informatiques puissants, de calculer numériquement la forme et le poids de la glace formée sur un profil. Ces outils, jumelés avec des outils de *CFD*, permettent de mesurer numériquement les pertes de puissance d'un profil de pale.

2.4.2.1 Modélisation, Jarinovsky et al

Les auteurs de cette étude ont utilisé une multitude de techniques afin de déterminer les pertes de performance d'une éolienne dans des conditions de givrage [40]. Dans un

premier temps, le code *LEWICE* de la NASA a été utilisé afin déterminer la forme des accrétions de glace sur un profil. Les formes des accrétions sont montrées à la *Figure 2.11*.

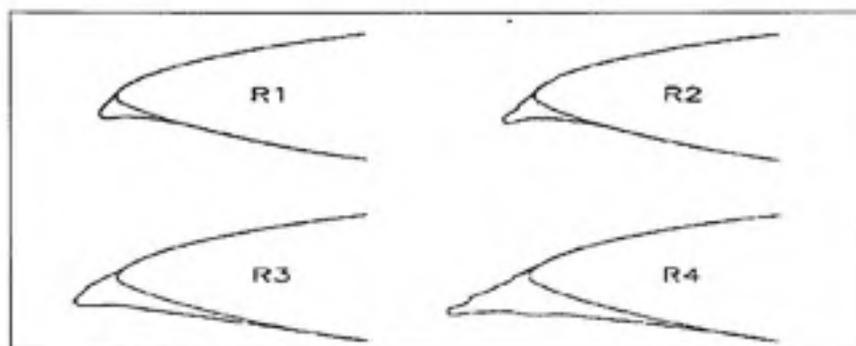


Figure 2.11 – Forme des accrétions sur le profil étudié [40].

Les formes de ces accrétions ont été reproduites à l'aide de styromousse sur le profil et ont été testées en soufflerie. Finalement, l'information obtenue a été insérée dans un code de prédiction de la performance (*PROPID*) d'une éolienne.

Pour une éolienne à pas variable, les auteurs prédisent une perte de puissance variant entre 14.5 % et 20 % selon le cas. Pour le cas d'une éolienne contrôlée par décrochage, les résultats obtenus et montrés sur la *Figure 2.12* sont plus complexes et difficiles à caractériser.

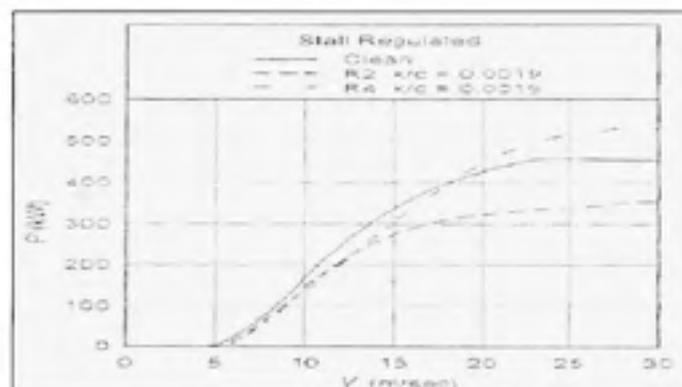


Figure 2.12 – Courbes de puissance de l'éolienne [40].

Pour des vitesses faibles, les pertes de puissance sont plus élevées, mais on remarque également pour des vitesses élevées, une puissance qui peut être supérieure à la puissance nominale de l'éolienne.

2.4.2.2 Modélisation, Hochart et al

Le *LIMA* (*Laboratoire International des Matériaux Antigivre*) a simulé sur un profil d'éolienne, à l'aide d'une soufflerie réfrigérée [41], les conditions de givre identifiées à Murdochville durant la campagne de mesure 2004-2005.

Les résultats obtenus permettent de prédire la perte de performance. Pour les deux cas simulés, les auteurs arrivent à la conclusion que l'éolienne ne produit plus en raison de l'augmentation importante de la traînée et de la diminution de la portance. La *Figure 2.13* présente la perte de portance et l'augmentation de la traînée, en régime d'accrétion sec, en fonction de la position radiale.

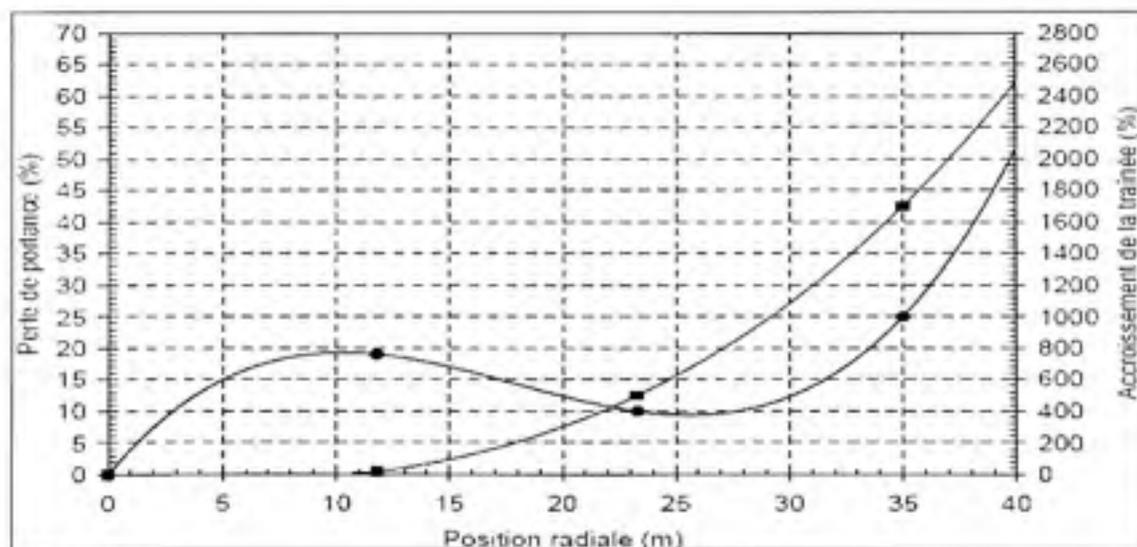


Figure 2.13 – Perte de portance et augmentation de la traînée sur un profil NACA 63-415 [41].

CHAPITRE 3

DESCRIPTION DES DONNÉES

Ce chapitre décrit les parcs éoliens étudiés et présente les données utilisées.

3.1 Parc éolien *Le Nordais*

Le parc éolien *Le Nordais* a été mis en service à la fin de l'année 1998. Avec ses 100 MW, il s'agissait, à l'époque, du plus important projet éolien au Canada. Les 133 éoliennes du parc sont réparties sur deux sites. Le complexe de Cap-Chat compte 76 éoliennes, alors que les 57 éoliennes restantes ont été installées près de la ville de Matane. Elles sont situées en territoire agricole et boisé, et se trouvent à des altitudes variées, mais ne dépassant pas 300 mètres. Le parc éolien est la propriété de la compagnie *Kenwind Industries*. Ce promoteur implantera prochainement près de 75 MW supplémentaires sur les mêmes sites.

La *Figure 3.1* montre l'emplacement général des parcs éoliens et des éoliennes. Les coordonnées et la numérotation des éoliennes sont présentées à l'*ANNEXE I*.



Figure 3.1 – Emplacement des sites et des éoliennes.

3.1.1 Les éoliennes

Les éoliennes installées ont une puissance nominale de 750 kW et ont été fabriquées par la compagnie *NEG Micon* (désormais la propriété du fabricant *Vestas*). Il s'agit d'éoliennes à axe horizontal ayant un diamètre de 48 mètres. Les éoliennes opèrent à une vitesse de rotation fixe et le contrôle de la puissance s'effectue par décrochage. La fiche technique de l'éolienne *NEG Micon* se trouve à l'*ANNEXE II*.

Les éoliennes sont adaptées au climat froid et possèdent, notamment, des instruments de mesure (anémomètre et girouettes) chauffés. Dans le cas des éoliennes à contrôle par décrochage, le pas des pales est fixe. Il est toutefois possible de régler, de façon manuelle, le pas des pales afin d'optimiser la performance en fonction de la densité moyenne de l'air du site. Des accélérateurs de décrochage (*stall strips*) ont également été ajoutés aux éoliennes du parc afin de prévenir la surproduction par temps de froid intense et de densité élevée.

3.1.2 Angles de calage des éoliennes

Il a été mentionné à la *section 3.1.1* que le contrôle de l'éolienne s'effectue par décrochage aérodynamique et que le calage des pales peut être modifié manuellement. L'angle de calage des pales de l'éolienne a un impact direct sur la puissance produite par l'éolienne, et doit être considéré dans le cadre de cette étude. L'historique des angles de calage est présenté à l'*ANNEXE III*. Nous montrerons à la *section 4.5*, la méthodologie utilisée afin de normaliser la puissance en fonction de l'angle de calage.

3.2 Description des données

Nous avons utilisé principalement trois sources de données dans le but d'identifier les pertes de puissance : données d'archive météorologique d'Environnement Canada (*EC*), données mesurées par les tours de référence des sites de Matane et de Cap-Chat (*REF*) et finalement, données provenant directement du système d'acquisition de

données des éoliennes (EOL). Les données couvrent la période du 1^{er} janvier 2000 jusqu'au 31 décembre 2003.

3.2.1 Données météorologiques (EC)

Les données météorologiques d'*Environnement Canada* ont été obtenues des *Archives nationales d'information et de données climatologiques*. Les données proviennent des stations de Mont-Joli (48° 36' N – 68°13' O – 52.40m) et de Cap-Chat (49° 60' N – 66° 39' O – 5.00m).

Dans les deux cas, les informations ont été recueillies à toutes les heures. Les fichiers initiaux, en format .csv, ont été convertis en format .mat. L'entête des fichiers originaux est présenté à l'ANNEXE IV.

On note que les données de précipitations sont des données journalières. Dans les fichiers .mat, la valeur de la précipitation pour chaque heure est égale à la valeur journalière. Les types de données provenant des deux stations sont légèrement différents, puisque la station météorologique de Mont-Joli est une station d'aéroport.

3.2.1.1 Instrumentation (EC)

Nous n'avons que très peu d'information sur les instruments de mesure utilisés et sur les calibrations effectuées. Ces informations, pour ces séries de données, ne sont pas absolument nécessaires, puisque les données (EC) ne seront utilisées que de façon à obtenir un portrait général des conditions climatiques. Nous savons toutefois que le vent est mesuré avec un anémomètre AES 78D, un modèle à hélices non chauffé. L'anémomètre est situé à une hauteur de dix mètres au-dessus du sol.

3.2.1.2 Disponibilité des mesures (EC)

La disponibilité des mesures est définie comme le rapport entre la durée des mesures valides sur la durée totale de la période de mesure. Pour les données brutes provenant

de Mont-Joli, la disponibilité des mesures est de 98.27 %. Pour les données brutes provenant de Cap-Chat, la disponibilité des mesures est de 99.87 %.

3.2.2 Tours de référence (REF)

Des tours de référence ont été érigées sur chacun des deux sites d'opération. La tour de référence du site de *Matane* ($48^{\circ}46'N - 67^{\circ}46'O - 125,74m$) a une hauteur de 51 mètres. Quant à la hauteur de la tour de référence du site de *Cap-Chat* ($49^{\circ}03'N - 66^{\circ}47'O - 27,12m$), elle est d'environ 55 mètres.

Les différents paramètres sont mesurés à une fréquence de 0.5 Hz puis moyennés toutes les minutes. Les fichiers initiaux, en format *.txt*, ont été convertis en format *.mat*. L'entête des fichiers originaux est présenté à l'ANNEXE IV. On remarque dans ces fichiers, que le système d'acquisition de données enregistre également certains paramètres provenant de l'éolienne de référence, en plus d'enregistrer les paramètres provenant des instruments installés sur la tour de mesures.

3.2.2.1 Instrumentation (REF)

Les instruments installés sur les tours de référence permettent de mesurer la vitesse et la direction du vent, la température et la pression atmosphérique. Le *Tableau 3.1* décrit les instruments installés et leurs positions verticales sur le mât.

Tableau 3.1

Instruments et positions des instruments

Instrument	Hauteur (m)		Modèle
	Matane	Cap-Chat	
Anémomètre	55,00	56,18	Vector A100L2 Pulse
Girouette	55,00	55,00	Vector WP200
Baromètre	40,00	15,00	Vegabar 20
Thermomètre	50,00	3,00	Vector T351 PX PRT
Système d'acquisition de données	NA	NA	Campbell CR10x

3.2.2.2 Corrections et notes importantes sur les mesures (REF)

Les différents paramètres de calibration et les paramètres programmés pour les anémomètres des deux tours de référence sont présentés dans le *Tableau 3.2*.

Tableau 3.2

Paramètre de calibration des anémomètres des tours de référence

Matane					
Paramètres de calibration			Paramètres programmés		
Date	C _{cal}	D _{cal}	Date	C _{prog}	D _{prog}
- 29/01/2001	0.10301	0.303	- 02/02/2001	0.10301	0.303
29/01/2001 -	0.04926	0.286	02/02/2001 -	0.04926	0.286
Cap-Chat					
Paramètres de calibration			Paramètres programmés		
Date	C _{cal}	D _{cal}	Date	C _{prog}	D _{prog}
- 25/01/2001	0.05000	0.125	- 25/01/2001	0.05000	0.125
25/01/2001 -	0.04925	0.288	25/01/2001 -	0.05000	0.125

L'anémomètre de la tour de Matane a été remplacé le 29 janvier 2001, les paramètres de calibration ont été reprogrammés le 2 février 2001. L'anémomètre de la tour de Cap-

Chat a été remplacé le 25 janvier 2001, les paramètres de calibration n'ont jamais été reprogrammés.

Le système d'acquisition des tours enregistre également la vitesse à la nacelle (V_{nac}) de l'éolienne de référence. Encore une fois, les paramètres de calibration programmés ne sont pas toujours exacts. Les différents paramètres de calibration et les paramètres programmés pour les vitesses à la nacelle des deux sites sont présentés dans le *Tableau 3.3*.

Tableau 3.3

Paramètre de calibration des anémomètres des éoliennes de référence

Matane, éolienne #6					
Paramètres de calibration			Paramètres programmés		
Date	C_{cat}	D_{cat}	Date	C_{prog}	D_{prog}
- 17/10/2000	0.55404	1.0874	- 02/02/2001	1.0000	0.0000
17/10/2000–17/09/2002	0.55099	0.9965	02/02/2001–17/09/2002	0.55099	0.9965
17/09/2002 -	0.58153	0.5707	17/09/2002 -	0.58153	0.5707
Cap-Chat, éolienne #67					
Paramètres de calibration			Paramètres programmés		
Date	C_{cat}	D_{cat}	Date	C_{prog}	D_{prog}
- 23/10/2000	0.56314	0.6827	Aucun paramètre programmé. Les valeurs représentent la fréquence de l'anémomètre.		
23/10/2000 -	0.56368	0.5544			

La girouette de la tour de Matane a été remplacée le 1^{er} février 2001. Avant cette date, la direction indiquée est décalée de 18.1° par rapport à la direction vraie. La girouette de la tour de Cap-Chat a également été remplacée le 1^{er} février 2001. Avant cette date, la direction indiquée est décalée de 10.0° par rapport à la direction vraie, par la suite il y a un décalage de 190.0° par rapport à la direction vraie.

Finalement, la puissance produite par l'éolienne [42] est également enregistrée par le système d'acquisition de données des tours de mesure. Dans le cas de Matane, la valeur enregistrée doit être corrigée à l'aide de l'expression suivante :

$$P_{\text{cofiense}} = 1.010 \times P_{\text{ANE}} + 5.1 \quad (3.1)$$

et à l'aide de l'expression suivante dans le cas de Cap-Chat.

$$P_{\text{cofiense}} = 1.025 \times P_{\text{ANE}} + 2 \quad (3.2)$$

La puissance dans les équations précédentes doit être exprimée en kW. Ces expressions permettent de corriger la puissance qui a été obtenue à l'aide d'instrument non-conforme à la norme IEC. Il s'agit d'une corrélation avec les valeurs de puissance lues sur un instrument conforme à la norme [43] [44].

3.2.2.3 Disponibilité des mesures (REF)

Afin de déterminer la disponibilité des différentes mesures provenant des tours de référence, nous éliminons les mesures qui ne sont pas situées à l'intérieur d'une plage normale. Les valeurs de la plage normale sont les suivantes :

- La vitesse du vent doit être comprise entre 0 m/s et 50 m/s;
- La direction du vent doit être comprise entre 0° et 360°;
- La température doit être comprise entre -50°C et 50°C;
- La pression atmosphérique doit être comprise entre 95 kPa et 106 kPa;
- La puissance doit être comprise entre -50kW et 1000kW.

Par ailleurs, une inspection visuelle des données démontre que certains instruments ont un comportement étrange ou suspect. Le *Tableau 3.4* présente les données qui ne seront pas considérées.

Tableau 3.4

Pannes des instruments de mesure

Matane			
Vitesse - Nacelle	10 février 2001	au	30 mars 2001
	10 août 2002	au	9 octobre 2002
Puissance	16 août 2002	au	26 juin 2003
Cap-Chat			
Vitesse - Référence	1 novembre 2000	au	15 novembre 2000
	26 mars 2002	au	5 avril 2002
Vitesse - Nacelle	24 septembre 2001	au	5 octobre 2001
Direction	10 mars 2003	au	14 mars 2003
	17 juin 2003	au	31 décembre 2003

La disponibilité, suite au retrait des valeurs erronées et des données suspectes, des différents paramètres mesurés est présentée dans le *Tableau 3.5*.

Tableau 3.5

Disponibilité des mesures des tours de références

Tour de référence, Matane				
	2000	2001	2002	2003
Brute	97.66%	97.39%	98.83%	96.44%
Vitesse – Réf.	97.66%	97.39%	98.83%	96.44%
Direction – Réf.	97.66%	97.39%	98.83%	96.44%
Pression – Réf.	97.60%	90.09%	98.78%	96.12%
Température – Réf.	97.66%	97.39%	98.83%	96.44%
Vitesse – Nacelle	97.66%	83.97%	82.39%	96.44%
Puissance – Nacelle	95.90%	92.92%	61.08%	50.93%
Tour de référence, Cap-Chat				
	2000	2001	2002	2003
Brute	91.46%	95.67%	95.25%	90.90%
Vitesse – Réf.	87.64%	92.18%	92.24%	90.90%
Direction – Réf.	91.46%	92.18%	95.25%	38.31%
Pression – Réf.	91.46%	92.18%	95.25%	90.86%
Température – Réf.	91.46%	92.18%	95.25%	90.90%
Vitesse – Nacelle	91.43%	89.46%	95.25%	90.90%
Puissance – Nacelle	90.69%	89.15%	94.08%	90.11%

3.2.2.4 Décalage dans le temps des mesures (REF)

Le système d'acquisition de données enregistre simultanément la valeur des paramètres mesurés par les instruments de la tour de référence et par certains instruments de l'éolienne de référence. Dans les fichiers *REF*, les valeurs enregistrées de vitesses de vent sont cohérentes.

Toutefois, lorsque l'on compare la valeur de la vitesse du vent, ou la puissance, enregistrée par le système d'acquisition de données de la tour (*REF*) et celui de l'éolienne (*EOL*), on remarque, dans certains cas un décalage temporel. La *Figure 3.2* illustre un exemple de ce décalage.

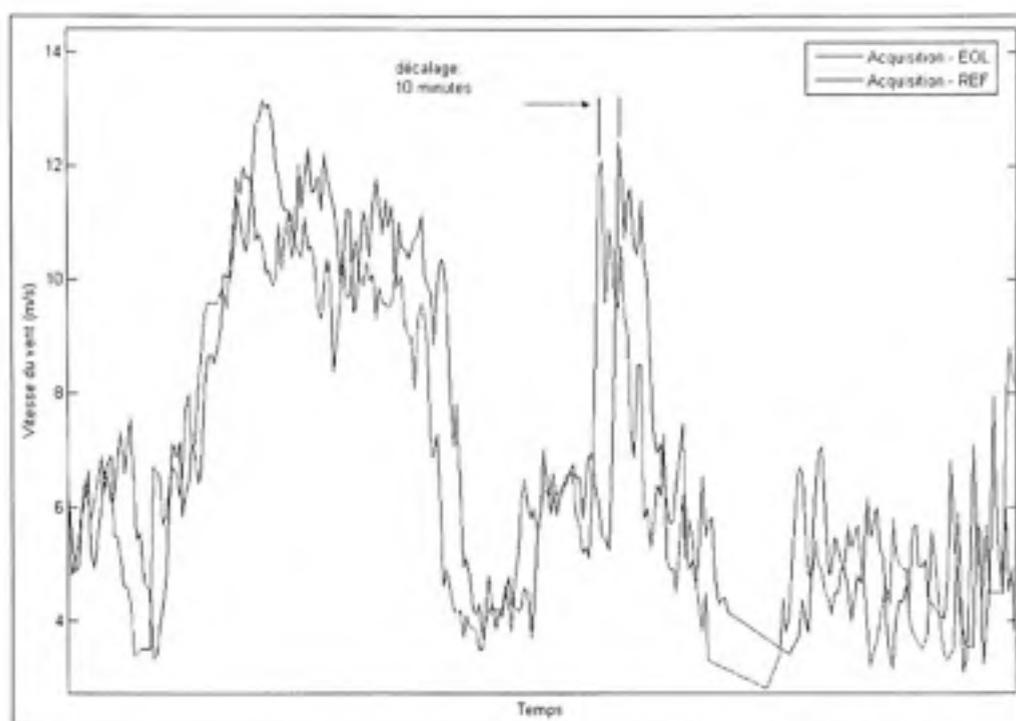


Figure 3.2 – Exemple de décalage entre les systèmes d'acquisition (Matane, 2000).

Ce décalage peut parfois atteindre près de 60 minutes et est causé par plusieurs facteurs : charge de la batterie, perturbations électriques ou magnétiques, erreurs de programmation, etc.

3.2.3 Système de mesures des éoliennes (EOL)

Nous avons également accès aux données d'opération de chacune des 133 éoliennes du parc éolien. Un total de 98 paramètres est sauvegardé par le système d'acquisition de données, dont la vitesse et la direction de la nacelle, la puissance produite, la disponibilité de l'éolienne et les codes d'arrêt.

Les différents paramètres sont mesurés à une fréquence de 0.5 Hz puis moyennés toutes les 10 minutes. Les fichiers initiaux, en format binaire, ont été convertis en format *.mat*. L'entête de ces fichiers est présenté à l'ANNEXE IV.

3.2.3.1 Instrumentation (EOL)

Le contrôle de l'opération de l'éolienne est effectué à partir des mesures d'un anémomètre *NRG Icefree* et de deux girouettes *NRG Icefree* situés sur le dessus de la nacelle. Les instruments sont chauffés. La *Figure 3.3* illustre la position des instruments sur l'éolienne.



Figure 3.3 – Instruments de mesure sur l'éolienne [42].

Les données sont enregistrées à l'aide d'un système d'acquisition de données de type *Ammonit Logger PM33*.

3.2.3.2 Notes importantes sur les fichiers (EOL)

Le système d'acquisition de données de l'éolienne considère qu'il y a *toujours 31 jours* par mois. Dans le cas des mois qui ont moins de 31 jours, des valeurs erronées apparaissent dans tous les champs des jours inexistantes.

Deux champs nous permettent de déterminer le statut de l'éolienne : *generator online* (98) et *error code* (97). Le premier des deux permet d'établir si l'éolienne est en fonction. La valeur que peut prendre ce champ est présentée dans le *Tableau 3.6*.

Tableau 3.6

Valeur possible pour le champ *Generator online*

0	L'éolienne n'est pas en opération. Il est possible de déterminer le code d'erreur enregistré par le système.
1	L'éolienne est en opération. Tous les paramètres d'opération de l'éolienne sont enregistrés.
32	Erreur, ce code semble indiquer que le système d'acquisition de données ne fonctionne pas. Tous les champs montrent des valeurs erronées. C'est également le code qui apparaît lorsque les mois ont moins de jours que les 31 jours standard du système d'acquisition de données.

Les codes d'erreur enregistrés par le système de contrôle prennent une valeur variant de 1 à 112. Dans les fichiers originaux, ces codes d'erreur sont additionnés de la valeur de 1000. Le *Tableau 3.7* présente les valeurs d'intérêt pour notre recherche.

Tableau 3.7

Valeur possible pour le champ *Error code*

0	Indique tout est normal.
1000	Indique un changement de vitesse de l'éolienne de 15 RPM à 22 RPM ou l'inverse.
1025	Indique que le détecteur de vibrations est activé.
1026	Indique un arrêt d'urgence.
1061	Indique un problème avec l'anémomètre (<i>anemometer error 1</i>).
1062	Indique un problème avec l'anémomètre (<i>anemometer error 2</i>).

Notons également que la valeur 32767 apparaît parfois dans un ou plusieurs champs et indique que les données sont erronées ou ne sont pas disponibles.

3.2.3.3 Corrections et notes importantes sur les mesures (EOL)

La vitesse lue du vent à la nacelle (V_{nac}) est corrigée pour tenir compte de la géométrie de la nacelle. La vitesse enregistrée (V_{fs}) est exprimée à l'aide de l'équation :

$$V_{fs} = 0.881 \times C_{cal} \times freq + D_{cal} \quad [3.3]$$

où la valeur de 0.881 est un coefficient fixe établi par le fabricant pour tenir compte du climat local, et où C_{cal} et D_{cal} sont les paramètres de calibration de l'anémomètre.

3.2.3.4 Disponibilité des mesures (EOL)

Afin de déterminer la disponibilité des différentes mesures provenant des éoliennes, nous éliminons les mesures qui ne sont pas situées à l'intérieur de la plage normale. Les valeurs de la plage normale sont les suivantes :

- La vitesse du vent doit être comprise entre 0 m/s et 50 m/s;
- La direction du vent doit être comprise entre 0° et 360°;
- La puissance doit être comprise entre -50 kW et 1000 kW.

En raison du grand nombre d'éoliennes, nous ne présenterons que les valeurs de disponibilité pour les deux éoliennes de référence. La disponibilité de certains des paramètres mesurés est présentée dans le *Tableau 3.8*.

Tableau 3.8

Disponibilité des mesures des éoliennes de référence

Matane, éolienne #6				
	2000	2001	2002	2003
Brute	94.59%	91.74%	94.64%	93.63%
Vitesse - Nacelle	94.12%	91.74%	94.64%	93.63%
Direction	94.59%	91.74%	94.64%	93.63%
Puissance	84.03%	81.47%	83.31%	79.97%
Cap-Chat, éolienne #67				
	2000	2001	2002	2003
Brute	94.63%	93.92%	88.28%	95.89%
Vitesse - Nacelle	94.17%	93.92%	88.28%	95.89%
Direction	94.26%	93.92%	88.28%	95.89%
Puissance	83.38%	80.24%	75.79%	78.20%

On remarque dans ce tableau que la disponibilité de la puissance est généralement inférieure aux autres paramètres enregistrés. Nous ne pouvons expliquer la raison de cette faible disponibilité.

CHAPITRE 4

MÉTHODOLOGIE

Tel que montré dans la revue de la littérature, nous pouvons prévoir que les précipitations et les brouillards givrants affecteront le comportement des éoliennes. Cette section décrit la méthodologie utilisée pour quantifier les pertes de puissance.

4.1 Concepts fondamentaux

Nous faisons l'hypothèse que les pertes de puissance seront principalement dues à deux phénomènes. Dans un premier temps, nous supposons que l'éolienne demeure en opération malgré les précipitations et les accrétions de glace, mais que sa performance est diminuée. La puissance aérodynamique perdue est exprimée de la façon suivante :

$$P_{aero} = P_{normale} - P_{givre} \quad (4.1)$$

Dans un deuxième temps, nous pouvons également supposer que les précipitations et accrétions de glace vont conduire, dans certaines conditions, à l'arrêt complet de l'éolienne. La puissance perdue due aux arrêts est alors égale à la puissance normalement produite :

$$P_{arrêts} = P_{normale} \quad (4.2)$$

Ainsi, la puissance totale perdue (P_{perdue}) est la somme de la puissance aérodynamique perdue et de la puissance perdue due aux arrêts.

La méthodologie élaborée repose donc sur quatre concepts fondamentaux : l'identification des événements de givre, la caractérisation des événements de givre, l'identification des impacts et la mesure de la puissance produite. Malgré la simplicité apparente de la problématique, nous notons l'apparition de nombreuses difficultés lorsque nous observons ces concepts de plus près.

4.2 Identification des périodes de givrage

L'identification des périodes de givrage est essentielle à la poursuite de nos investigations. Pour y parvenir, nous divisons le phénomène en deux phases distinctes. La *Figure 4.1* illustre ces deux phases. Dans un premier temps, il y a présence d'un phénomène givrant particulier (t_{givrage}) pouvant, selon son intensité et sa durée, entraîner une perte de performance et même l'arrêt complet de la turbine. Dans un deuxième temps, le phénomène givrant ne se produit plus, mais le comportement de l'éolienne demeure affecté jusqu'à ce que les pales et les instruments se libèrent des accrétions de glace.

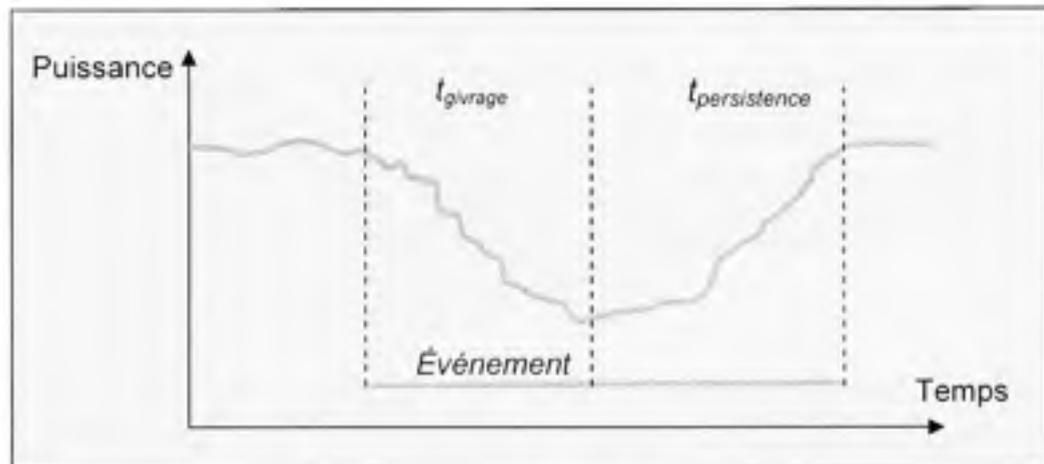


Figure 4.1 – Différentes phases d'un événement de givre.

Pour chacun des événements givrant, le défi est donc d'identifier la durée des deux phases et de caractériser la précipitation ou le brouillard givrant lors de la première phase : conditions météorologiques, type de phénomène, intensité du phénomène, teneur en eau liquide et diamètre moyen des gouttelettes.

Il est extrêmement difficile d'identifier les deux phases pour le parc éolien *Le Nordais*, puisqu'il n'y a pas de givromètre installé et que nous n'avons pratiquement aucune information visuelle accompagnant les données. Nous pouvons néanmoins identifier le

temps total de l'événement. Pour y parvenir, nous effectuons une analyse des données météorologiques et opérationnelles disponibles.

Les données recensées à l'aide des techniques qui suivent ne fournissent qu'un large éventail d'événements potentiels. L'identification des événements véritables se fait en observant attentivement les données, en intégrant des notions de météorologie locale et d'observations visuelles lorsqu'elles existent.

4.2.1 Données historiques et informations visuelles (DHVIS)

Plusieurs sources de données peuvent nous renseigner sur des conditions météorologiques exceptionnelles lorsqu'elles se produisent. Les journaux locaux et des organismes météorologiques spécialisés (*Météomedia*, etc.) recensent parfois les événements de pluies verglaçantes ou de brouillards givrants. Nous utiliserons principalement dans le cadre de cette étude, les observations visuelles notées, par *Environnement Canada*, à l'aéroport de Mont-Joli. On décrit à toutes les heures, dans ces bulletins, les conditions météorologiques existantes.

Nous identifions ensuite les données provenant des tours de référence (*REF*) qui correspondent aux périodes de pluie verglaçante ou de brouillard givrant identifiés à Mont-Joli. Il est probable qu'il y ait un décalage entre les horloges des deux systèmes d'acquisition de données, mais il demeure quand même possible d'établir une comparaison des divers paramètres météorologiques.

4.2.2 Température et humidité (DRHT)

Selon les études descriptives des conditions météorologiques durant un événement de brouillard givrant, la valeur de l'humidité relative est généralement supérieure à 80% alors que la température se situe habituellement sous 0°C. Aucune mesure d'humidité relative n'est enregistrée sur les tours de référence (*REF*) des sites de Matane et de Cap-Chat. Nous utiliserons donc la valeur horaire d'humidité relative provenant des stations météorologiques (*EC*) de Mont-Joli et de Cap-Chat.

Nous utiliserons les données de Mont-Joli pour l'étude du site de Matane, bien que la ville de Mont-Joli soit située à 62 km au sud-ouest de Matane. Cette transposition géographique des données est possible puisque la différence de la valeur des humidités relatives entre Mont-Joli et Cap-Chat est en moyenne de 0.1%. Cette utilisation des données n'induera pas d'erreur majeure puisque nous sommes uniquement intéressés par un portrait temporel des conditions d'humidité relative et de température.

On rappelle ici, la faiblesse de cet outil comme outil de prédiction : les conditions d'humidité relative et de température énoncées ci-haut ne sont qu'un indicateur d'événement potentiel de givrage atmosphérique.

4.2.3 Précipitation liquide par temps froid (DPL)

Par définition, la pluie verglaçante se produit lorsque la pluie entre en contact avec des surfaces dont la température se trouve sous le point de congélation. La technique (DPL) est difficilement utilisable dans notre cas puisque les données d'*Environnement Canada (EC)* ne recensent que la quantité journalière de la précipitation. Un détecteur de pluie est présent sur la tour de référence (*REF*) du site de Matane et les données sont disponibles pour la période allant du 1er mars 2001 au 31 décembre 2003. Nous identifions les périodes pour lesquelles il y a présence de pluie alors que la température est en dessous de 0°C.

4.2.4 Comparaison entre un anémomètre chauffé et non chauffé (DACNC)

Il a été démontré que le comportement des anémomètres est grandement affecté par le givrage. Il existe une corrélation linéaire, montrée sur la *Figure 4.2*, entre la vitesse du vent mesurée – à la tour de référence (*REF*) – à l'aide d'un anémomètre non-chauffé et la vitesse du vent mesurée – à la nacelle (*EOL*) – à l'aide d'un anémomètre chauffé. La *Figure 4.2* illustre les vitesses alors que l'éolienne est en opération.

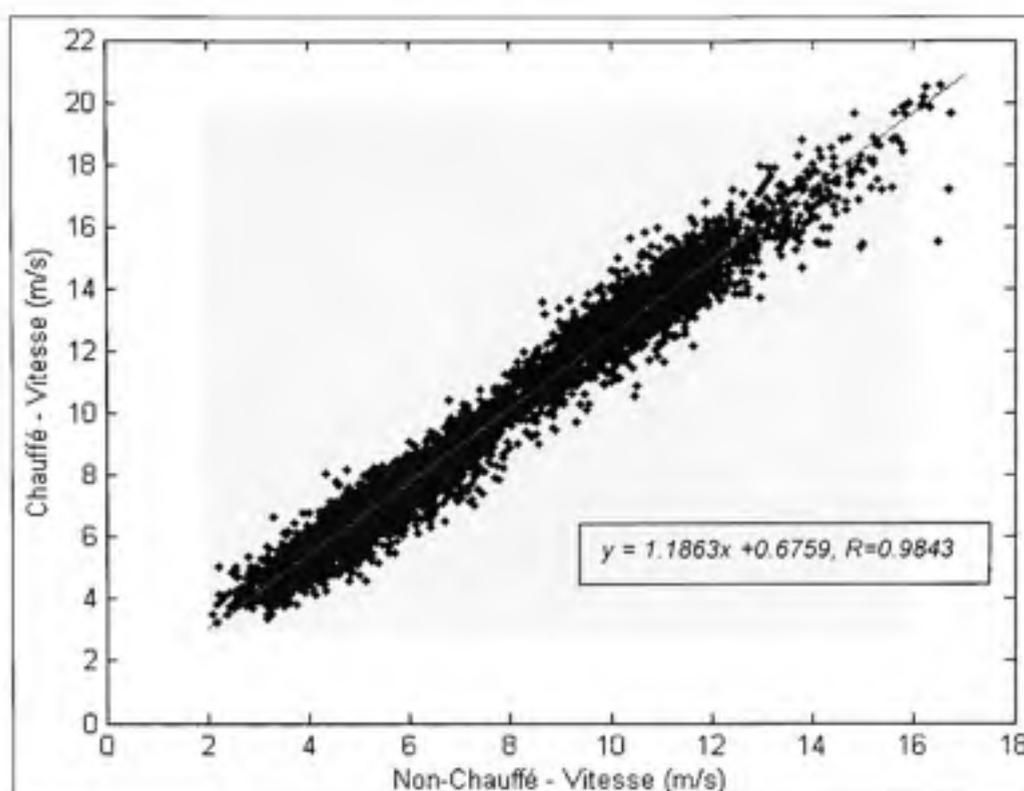


Figure 4.2 – Corrélation entre les vitesses (Matane, juillet 2000, 270°).

Lors d'un événement de givre, on suppose une modification du comportement de l'anémomètre non chauffé. La valeur lue par ce dernier s'éloignera vraisemblablement de la droite de corrélation idéale. On note que la distribution des données ne se fait pas toujours selon la loi normale, en particulier lorsqu'il y a présence de valeurs anormales.

Le repérage de ces valeurs anormales se fait en identifiant les valeurs limites minimums et maximums au-delà desquelles les valeurs mesurées par l'anémomètre non chauffé sont considérées anormales. Ces valeurs minimum et maximum sont fonction de la distribution des données pour chaque *bin*. C'est-à-dire que nous séparons les vitesses mesurées par l'anémomètre chauffé en *bins*, et cela pour chaque *bin* de la vitesse de l'anémomètre non chauffé. (Voir la *Figure 4.3*) Nous effectuons cette analyse en séparant les données en fonction de la disponibilité de l'éolienne (éolienne en marche, éolienne arrêtée) et de la direction du vent (16 secteurs de 22.5°).

En cas de givrage de l'anémomètre non chauffé, la valeur lue sur ce dernier sera inexacte jusqu'à ce qu'il soit dégivré manuellement ou en raison de la température.

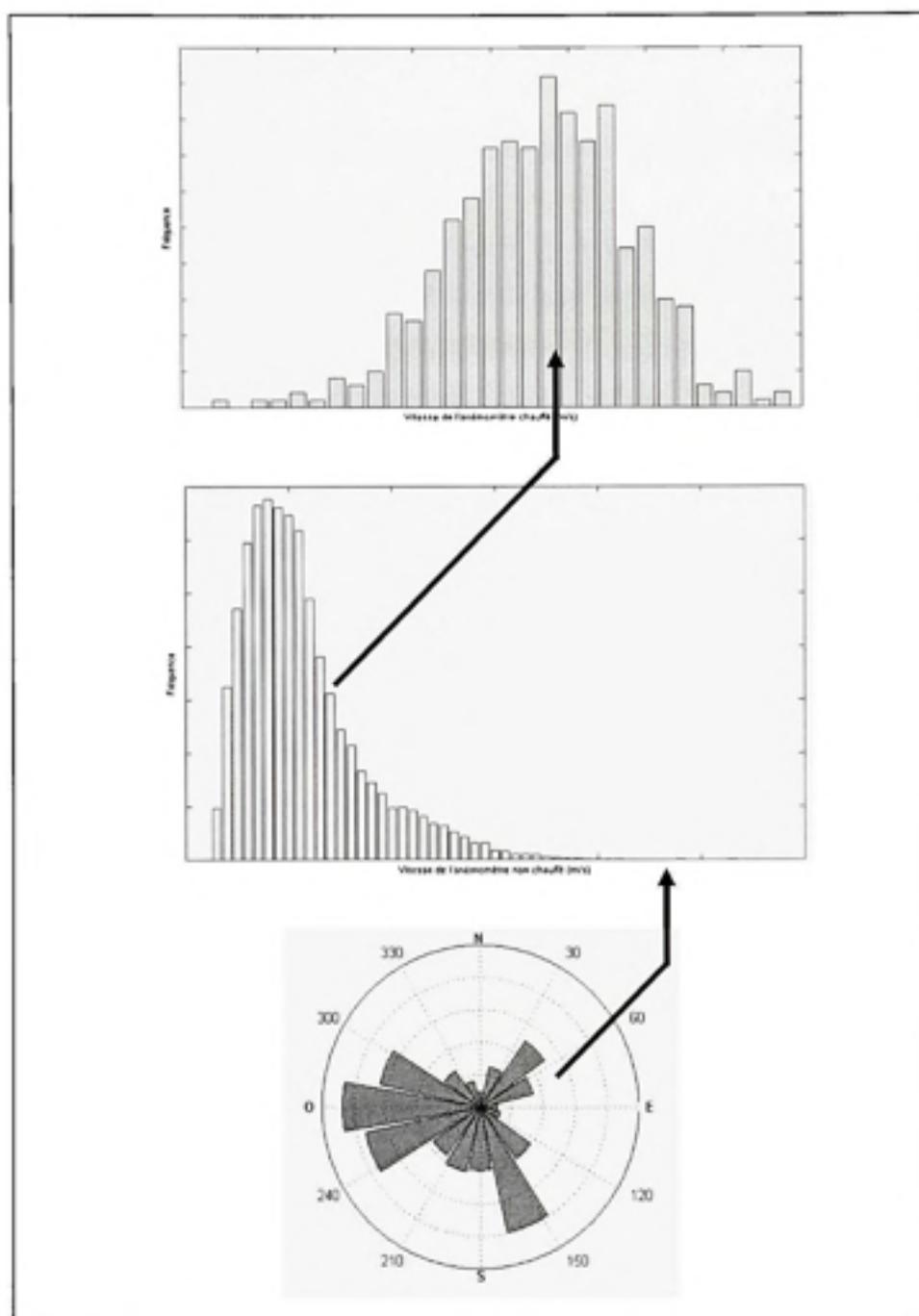


Figure 4.3 – Analyse des différences entre deux anémomètres.

Les valeurs nulles de la vitesse de l'anémomètre non chauffé seront traitées séparément afin de ne pas influencer la distribution des données. On repère les valeurs nulles ($u < 1.25$ m/s) mesurées par l'anémomètre non chauffé alors que la vitesse mesurée par l'anémomètre chauffé est supérieure à 3 m/s.

4.2.5 Lecture erronée sur un anémomètre/girouette non chauffé (DAE)

La technique précédente exige de comparer le comportement de deux anémomètres distants l'un de l'autre. En effet, l'un est situé sur la tour de référence alors que l'autre se trouve à une distance de plusieurs dizaines de mètres sur l'éolienne de référence. Cette configuration des anémomètres peut mettre en lumière des différences importantes de lectures qui ne sont pas dues au givrage des instruments.

Une autre technique permet d'identifier la formation de givrage sur un anémomètre ou une girouette non chauffé. Premièrement, si la vitesse mesurée par l'anémomètre non chauffé, ne varie pas (*écart-type inférieur à 2% de la moyenne*) sur une période de 30 minutes, on suppose que l'instrument est givré ou défectueux. Deuxièmement, si la direction lue par girouette non chauffée, ne varie pas (*écart-type inférieur à 0.5% de la moyenne*) sur une période de 30 minutes alors que la vitesse du vent est supérieure à 4 m/s, on suppose que la girouette est défectueuse ou affectée par le givre.

4.2.6 Puissance inférieure à la normale (DPIP)

Suivant l'hypothèse principale de ce mémoire, la performance de l'éolienne diminuera lors d'un événement de givrage, que ce soit en raison du givrage des pales ou des instruments de contrôle. On pourrait également observer une augmentation de la performance de l'éolienne, puisque les instruments de mesure pourraient être affectés avant l'éolienne par un événement de givre.

Il existe plusieurs méthodes pour détecter les données où la puissance est inférieure à la normale. Pour chaque *groupe fini*, on peut utiliser un écart fixe (-25% ou -100 kW) ou un écart variable (-3 écarts-types) par rapport à la courbe normale. Toutefois, tel que

montré à la *Figure 4.4*, ces méthodes ne sont pas parfaites et vont, dans certains cas, surestimer ou sous-estimer le nombre de données anormales.

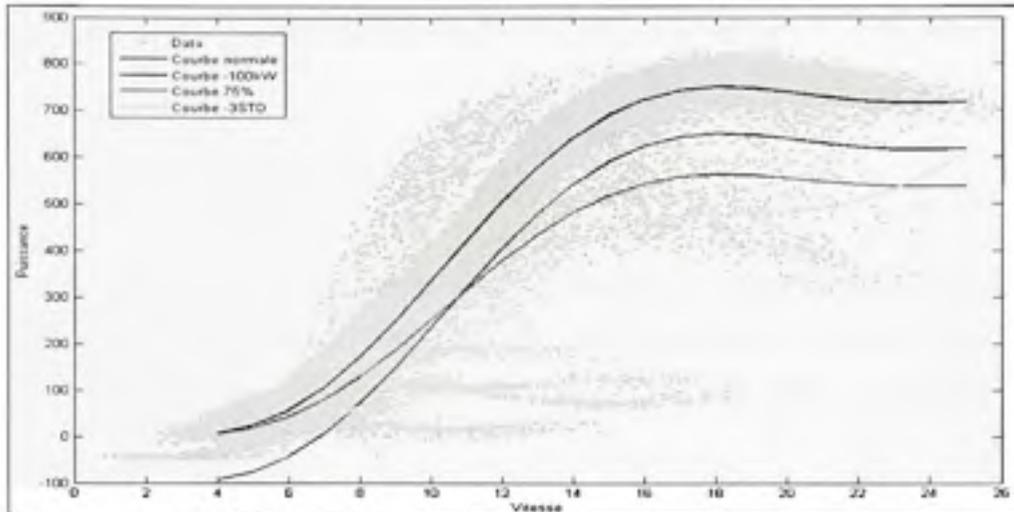


Figure 4.4 – Identification des données suspectes selon la dispersion.

Nous choisissons plutôt de réaliser une inspection visuelle des données et d'identifier les données anormales selon la distribution des données. La *Figure 4.5* illustre la précision de cette méthode. Cette façon de procéder apportera des résultats plus significatifs et ne nécessite pas l'établissement de la courbe normale *à priori*.

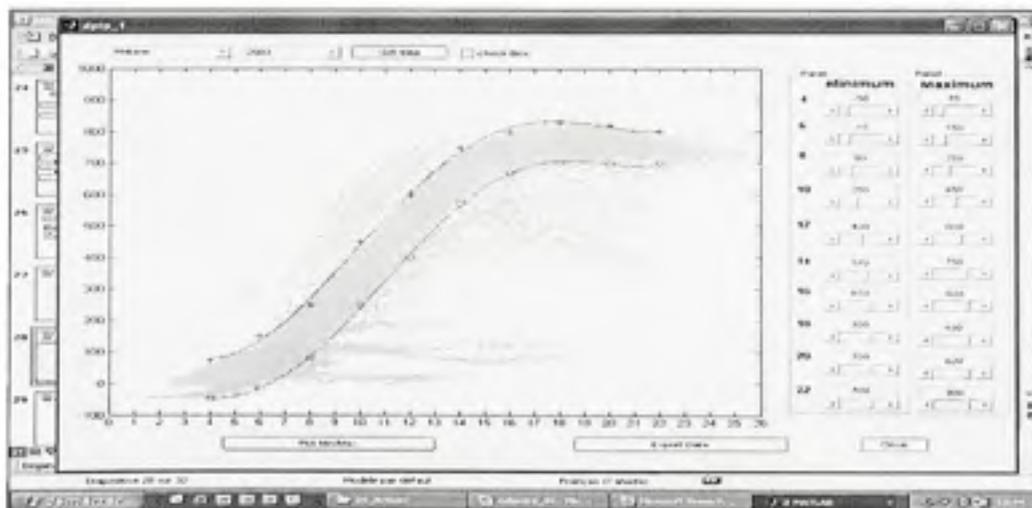


Figure 4.5 – Identification visuelle des données suspectes.

L'utilisation de cet outil pour identifier des périodes de givre peut sembler inadéquate puisque l'on cherche justement à quantifier les pertes de puissance dues au givre. Nous posons donc qu'un événement de givre ne peut être identifié sur la seule foi de cet outil, mais qu'il doit obligatoirement y avoir corroboration de la part d'au moins un autre outil.

4.2.7 Codes d'erreur de l'éolienne (DCE)

L'outil développé dans la section précédente suppose que l'éolienne demeure en production lors d'un événement de givre. On peut également supposer que l'impact d'un événement de givre ne sera pas une perte de performance, mais bien un arrêt complet de l'éolienne.

Dans un premier temps, nous identifions les périodes où l'éolienne est arrêtée. Dans un deuxième temps, nous analysons les codes d'erreur de l'éolienne et identifions les périodes pour lesquelles le code d'erreur (voir Tableau 3.7) peut indiquer un événement de givre potentiel.

4.3 Caractérisation des événements de givre

Les outils développés jusqu'à présent permettent uniquement d'identifier ou de supposer l'existence d'un phénomène givrant. On devrait, idéalement, pouvoir caractériser ce phénomène selon la teneur en eau liquide (*LWC*) et le diamètre médian des gouttelettes (*MVD*). Malheureusement, il n'existe pas d'instruments dans ces deux parcs permettant de quantifier ces deux paramètres.

4.4 Identification des impacts

Les précipitations et les accrétions de glace peuvent se produire sur les pales et sur les instruments de mesure et de contrôle de l'éolienne. Le *Tableau 4.1* permet d'associer un numéro caractéristique à un événement de givre. Le type d'événement est d'abord

identifié, puis l'on constate le statut de la turbine. (Ex. : Pluie verglaçante ayant causé une puissance diminuée – 212)

Tableau 4.1

Impact des événements de givre

Cause		Impact	
Précipitations ou événement de givrage	(1) Pluie	(1) Production	(1) Surproduction
	(2) Pluie verglaçante		(2) Sous-production
	(3) Brouillard givrant	(2) Arrêt	(3) Vibration
	(4) Neige mouillée		(4) Bris
			(5) Mesures

4.5 Construction des courbes de puissance

La courbe de puissance d'une éolienne permet d'établir la puissance produite en fonction de la vitesse du vent. La *norme IEC 61400 Part 121 : Power performance measurements of grid connected wind turbines* a été développé dans le but d'établir de façon précise et rigoureuse la courbe de puissance d'une éolienne. La norme peut donc être utilisée par un opérateur qui désire comparer la performance expérimentale avec les performances prédites par le concepteur.

Dans cette étude, nous utilisons la courbe de puissance dans le but de quantifier les pertes de puissance induites lors des périodes de givre. L'utilisation et le respect intégral de la norme ne sont pas toujours possibles dans notre cas, et cela, pour plusieurs raisons, mais nous en conserverons néanmoins l'esprit pour le développement de nos courbes de puissances. Nous présentons ici les principaux points de la norme en relation avec les éléments de la méthodologie préconisée.

4.5.1 Site de mesure

Selon la norme IEC (*norme*), un site de mesure est défini par un mat météorologique et par une turbine de référence. L'utilisation d'un mat de mesure permet, entre autres, de mesurer la vitesse du vent sans que l'écoulement ne soit modifié par le sillage de l'éolienne. Le mat de mesure devrait être situé à une distance de 2 à 4 fois le diamètre de l'éolienne. Pour le site de Matane, la distance est de 149.78 mètres, soit 3.11 fois le diamètre. Pour le site de Cap-Chat, la distance est de 84.65 mètres, soit 1.76 fois le diamètre. Par ailleurs, la disposition des équipements sur les mâts et les mâts eux-mêmes ne respectent pas les exigences de la *norme*.

La topologie du terrain affecte également la précision de la méthode présentée dans la *norme*. La pente du terrain ne devrait pas dépasser une valeur variant de 4° à 13° selon la distance de la turbine. Les deux sites à l'étude respectent cette contrainte.

Finalement, la *norme* exige l'identification des secteurs libres de perturbations. L'écoulement de l'air est modifié par la présence d'obstacle environnant tels des bâtiments, les autres turbines du parc éolien et le mât de mesure. Nous ne pouvons suivre cette exigence de la *norme*, car l'identification de secteurs libres de perturbations éliminerait vraisemblablement des données où il y a présence de givre.

Bien que cet aspect de la *norme* soit exclu de notre méthodologie, on retrouvera à l'ANNEXE V, les détails menant à l'identification de ces secteurs. Ces informations permettent de mieux comprendre certains des phénomènes se produisant sur les sites de Matane et Cap-Chat. Puisque nous voulons étudier tous les secteurs de mesure, *il devient impossible d'utiliser la vitesse du vent mesuré à la tour de référence, et c'est pourquoi nous établirons les courbes de puissance à partir de la vitesse mesurée à la nacelle*. Une version préliminaire de la norme IEC 61400-12-2 – *Verification of power performance of individual wind turbines* – permet d'ailleurs de mesurer la performance d'une turbine à l'aide de la vitesse mesurée à la nacelle lorsque l'application des exigences de la *norme* n'est pas possible [45].

4.5.2 Équipement de mesure

La norme spécifie le type d'instruments de mesure à utiliser, leur hauteur et leur position sur le mât de mesure.

Nous n'avons pas d'information sur les instruments servant à mesurer la puissance produite et ne pouvons juger du respect de la norme pour cet élément. La vitesse du vent doit être mesurée à l'aide d'un anémomètre à coupole. La direction du vent doit être mesurée à l'aide d'une girouette. Ces deux instruments seront situés à plus ou moins 2.5% de la hauteur du rotor. Ces exigences de la *norme* sont respectées pour les deux sites.

La densité de l'air doit être obtenue à partir de la mesure de la température et de la pression de l'air. Le thermomètre doit être installé +/-10 mètres de la hauteur du rotor. Le baromètre doit être *suffisamment* près du rotor de la turbine. Ces exigences sont respectées pour le site de Matane uniquement. Pour le site de Cap-Chat, nous ne corrigerons pas les valeurs puisque nous sommes principalement intéressés par des différences relatives de puissance.

4.5.3 Construction de la courbe de puissance normale

Nous devons d'abord éliminer les données mesurées lorsque l'éolienne n'est pas en opération normale. Dans notre cas nous éliminerons toutes les périodes de givrage identifiées. Les données de vitesse et de direction du vent doivent être échantillonnées à une fréquence de 1Hz, ce qui deux fois plus que la fréquence d'échantillonnage des données du mât de mesure.

Pour une éolienne dont le contrôle s'effectue par décrochage aérodynamique, la normalisation des données doit s'appliquer sur la puissance. La puissance normalisée s'exprime en fonction de la densité standard de l'air au niveau de la mer (1.225 kg/m^3) et s'écrit ainsi :

$$P_N = P_{\text{mesurée}} \times \frac{\rho_o}{\rho_{\text{mesurée}}} \quad (4.3)$$

Suite à la normalisation, les données sont classées à l'aide de la méthode des *bins*. On doit utiliser des groupes d'une étendue de 0.5 m/s centré sur des multiples de 0.5 m/s. La base de données possédera, selon la norme, un minimum de 180 heures de données et un minimum de 30 minutes de données dans chaque groupe fini. Nous tenterons de respecter ces directives pour chacun des secteurs étudiés.

4.5.4 Normalisation de la puissance en fonction de l'angle de calage

La méthodologie montrée aux précédentes sections doit s'appliquer à des données dont l'angle de calage est constant. L'éolienne de référence du site de Matane a subi *six changements* de réglage durant la période 2000-2003. L'éolienne de référence du site de Cap-Chat a subi, de son côté, *deux changements* de réglage.

La normalisation de la puissance est obtenue en déterminant les courbes normales pour deux séries de données à des calages différents. Nous avons, au préalable, éliminé les données anormales en suivant la méthodologie décrite à la *section 4.2.6*. Nous obtenons ainsi deux courbes normales sur lesquelles on distingue trois zones de normalisation. La *Figure 4.6* illustre ces deux courbes pour le site de Matane.

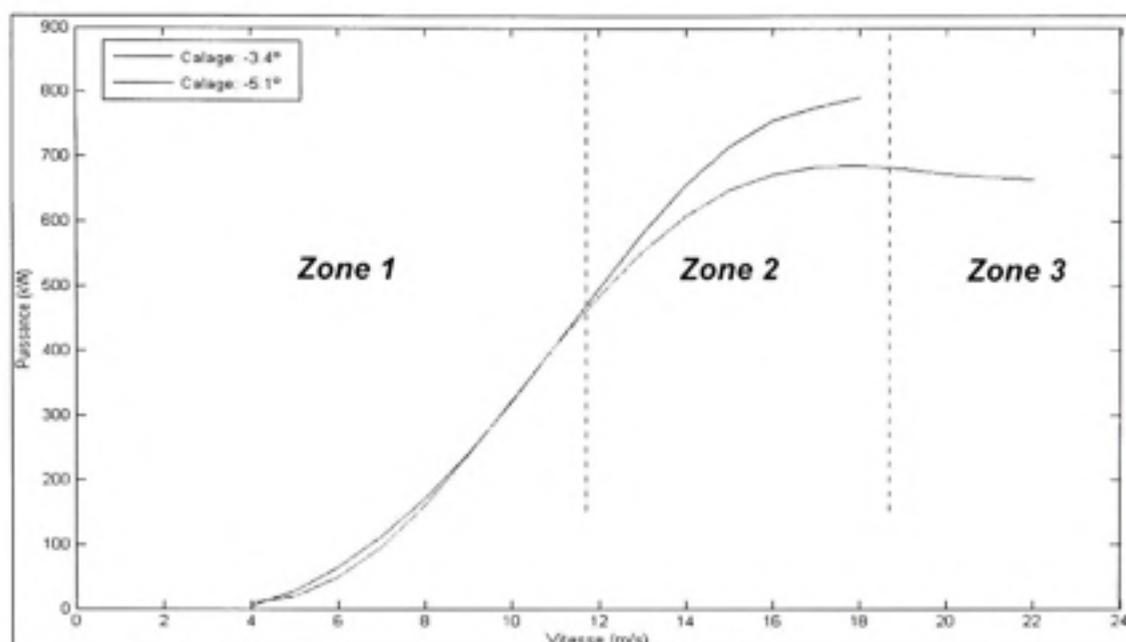


Figure 4.6 – Normalisation selon l'angle de calage

Aucune normalisation n'est effectuée dans la *zone 1*. Nous faisons l'hypothèse que jusqu'à une certaine vitesse, la puissance mesurée est indépendante de l'angle de calage. Dans la *zone 2*, les mesures de puissance sont normalisées linéairement en fonction de l'angle de calage et de la vitesse. La *zone 3* représente la zone où il n'y pas suffisamment de données dans les *bins* de l'une ou des deux courbes. Nous faisons l'hypothèse que la puissance varie toujours en fonction de l'angle de calage, mais non de la vitesse.

CHAPITRE 5

CARACTÉRISATION DU CLIMAT

Nous amorçons la présentation des résultats par une caractérisation sommaire du climat affectant les deux parcs éoliens. Cette caractérisation du climat permet dans un premier temps, de décrire l'environnement opérationnel dans lequel évoluent les turbines. Cette caractérisation permet également de mettre en lumière certains phénomènes climatiques locaux.

5.1 Température

La température affecte l'opération des turbines de deux façons. La densité, et donc la puissance produite, augmentent lorsque la température diminue. Il existe toutefois une température limite inférieure (généralement -25°C) pour laquelle les éoliennes seront vraisemblablement stoppées.

La *Figure 5.1* et la *Figure 5.2* montrent, pour le site de Matane, la variation des moyennes mensuelles de température pour les années 2000-2003 ainsi que la moyenne mensuelle pour l'ensemble de la période à l'étude. On remarque, premièrement, qu'il y a peu de variation d'une année à l'autre. Deuxièmement, on observe un total de huit mois où la température minimale s'est retrouvée sous 0°C et un total de quatre mois où la température moyenne est sous le point de congélation.

Les températures pour le site de Cap-Chat sont montrées sur la *Figure 5.3* et sur la *Figure 5.4*. On remarque que les moyennes de température sont légèrement inférieures à celles du site de Matane. De la même façon, on observe un total de neuf mois où la température minimale s'est retrouvée sous 0°C et un total de quatre mois où la température moyenne est sous le point de congélation.

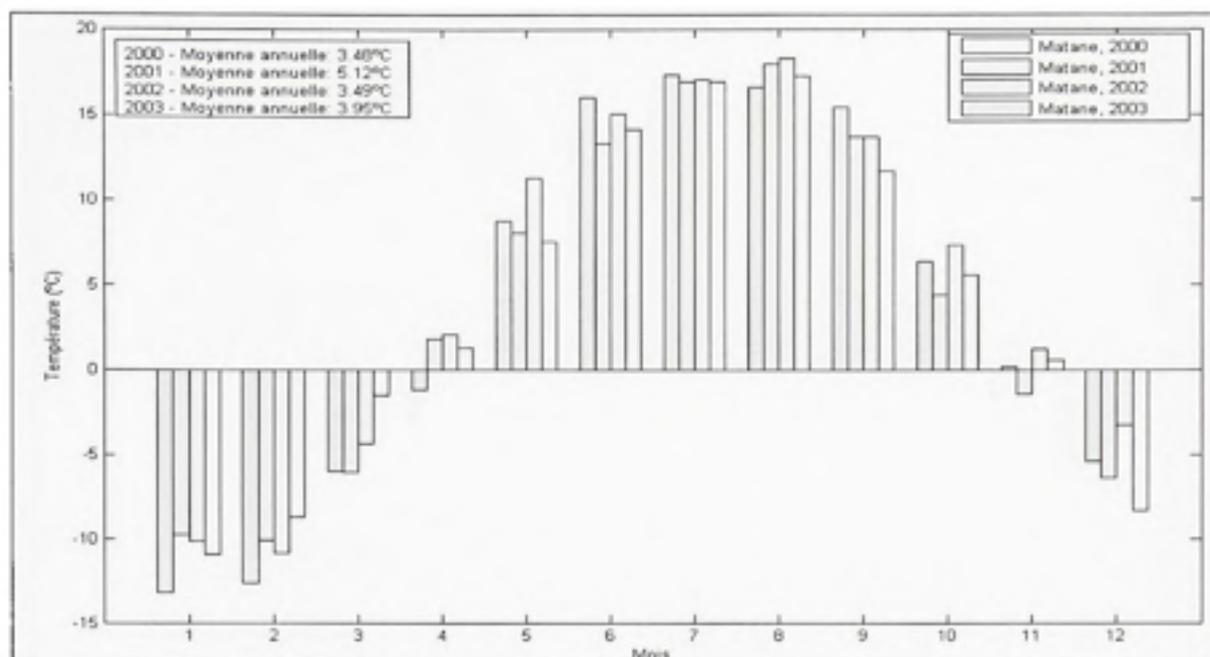


Figure 5.1 – Variation de la température mensuelle (Matane).

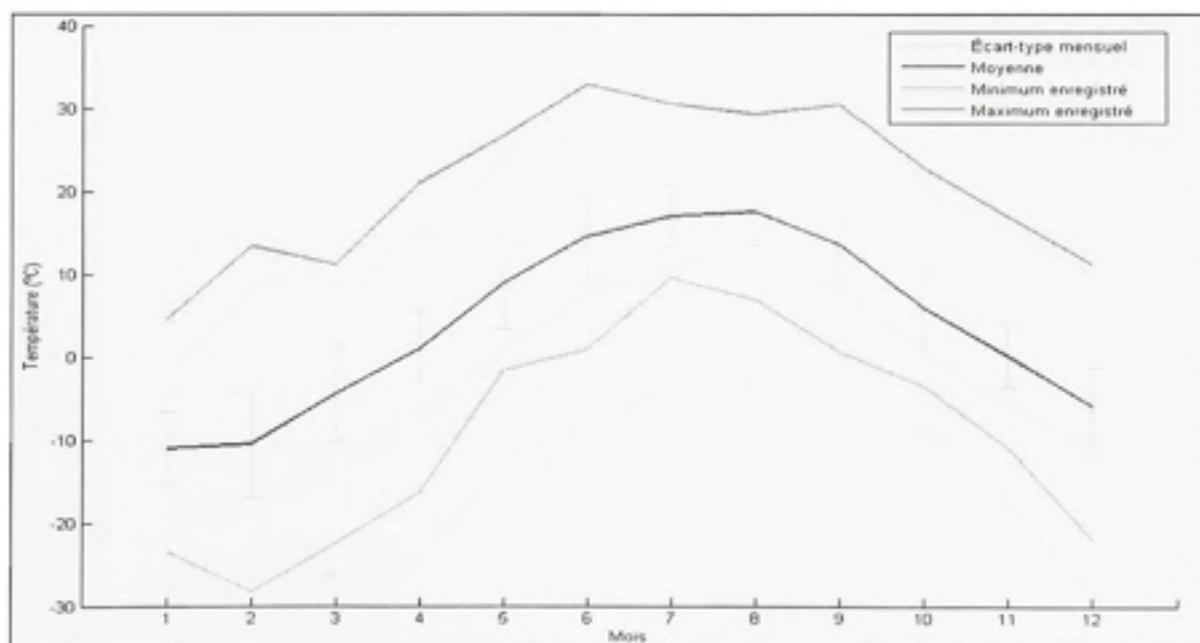


Figure 5.2 – Température mensuelle moyenne 2000-2003 (Matane).

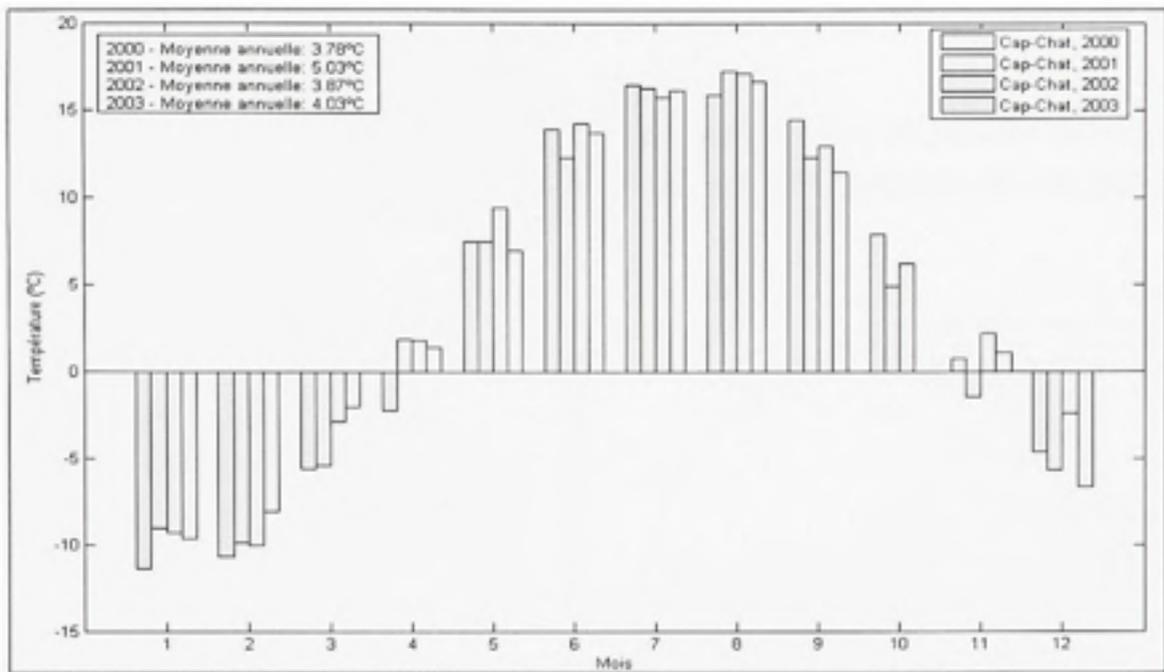


Figure 5.3 – Variation de la température mensuelle (Cap-Chat).

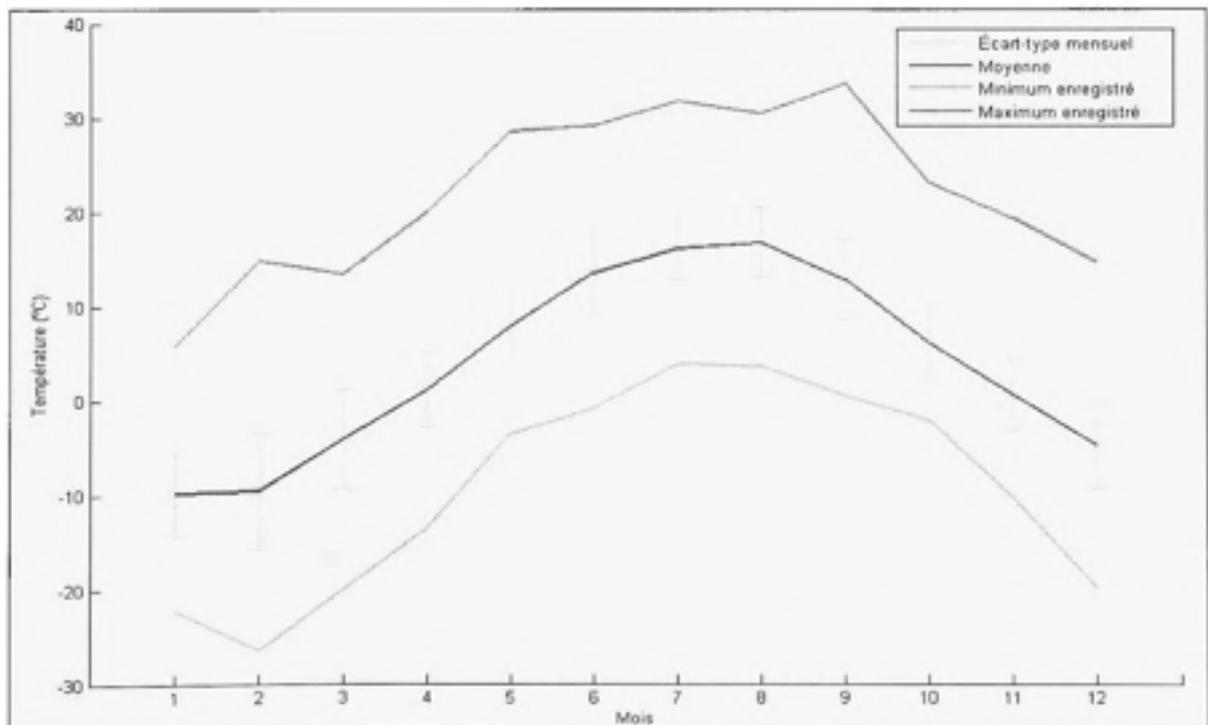


Figure 5.4 – Température mensuelle moyenne 2000-2003 (Cap-Chat).

5.2 Direction des vents

La direction des vents est l'un des aspects essentiels de la caractérisation de la ressource éolienne. La *Figure 5.5* montre les roses des vents pour les sites de Matane et Cap-Chat.

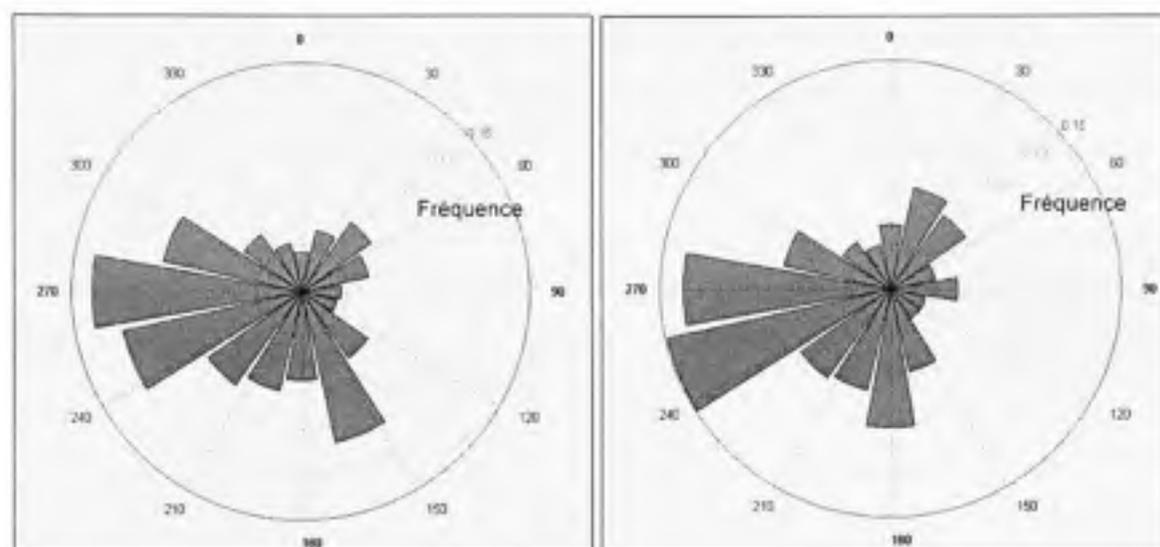


Figure 5.5 – Roses des vents, Matane (gauche) et Cap-Chat (droite), 2000-2003.

Les deux figures montrent clairement la direction principale du vent sur les deux sites. On peut affirmer, dans le cas de Matane, que 47% des vents proviennent de la direction ouest. Pour le site de Cap-Chat, cette proportion est d'environ 46%. On remarque également deux directions secondaires, soit le sud et le nord-est, qui sont similaires pour les deux sites.

5.3 Vitesse des vents

Nous utilisons la vitesse mesurée à la tour de référence (*REF*) pour caractériser la vitesse du vent sur les sites. Dans un premier temps, nous utilisons uniquement les secteurs de mesures valides calculés à l'*ANNEXE V*. Pour la tour de référence du site de Matane, le secteur valide est compris entre 156.3° et 19.1° , et contient 71% de toutes les données enregistrées. Le secteur valide est situé entre 137.9° et 33.2° pour

la tour de référence du site de Cap-Chat et contient 83% de toutes les données enregistrées. Dans un deuxième temps, nous caractérisons la vitesse en utilisant l'ensemble des données, incluant les données provenant des secteurs de mesure non valides.

La *Figure 5.6* montre la distribution des vitesses du vent ainsi que la courbe de Weibull pour la période 2000-2003 sur le site de Matane. Pour les secteurs valides, la vitesse moyenne sur le site est de 6.92 m/s, alors que l'écart-type est de 3.56 m/s. Pour l'ensemble des données, ces valeurs sont respectivement de 6.54 m/s et 3.59 m/s.

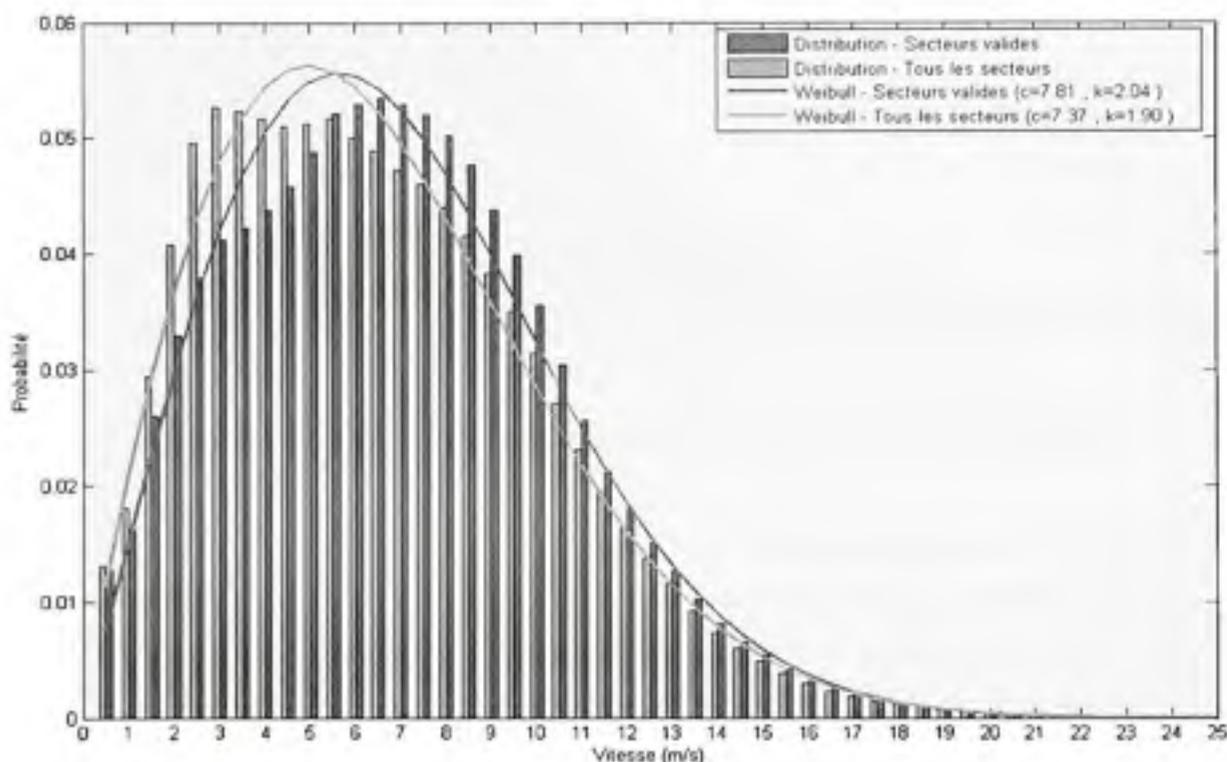


Figure 5.6 – Distribution et courbe de Weibull pour le site de Matane.

La *Figure 5.7* montre la distribution des vitesses du vent ainsi que la courbe de Weibull pour la période 2000-2003 sur le site de Cap-Chat. Pour les secteurs valides, la vitesse moyenne sur le site est de 6.02 m/s, alors que l'écart-type est de 4.03 m/s. Pour l'ensemble des données, ces valeurs sont respectivement de 5.60 m/s et 4.00 m/s.

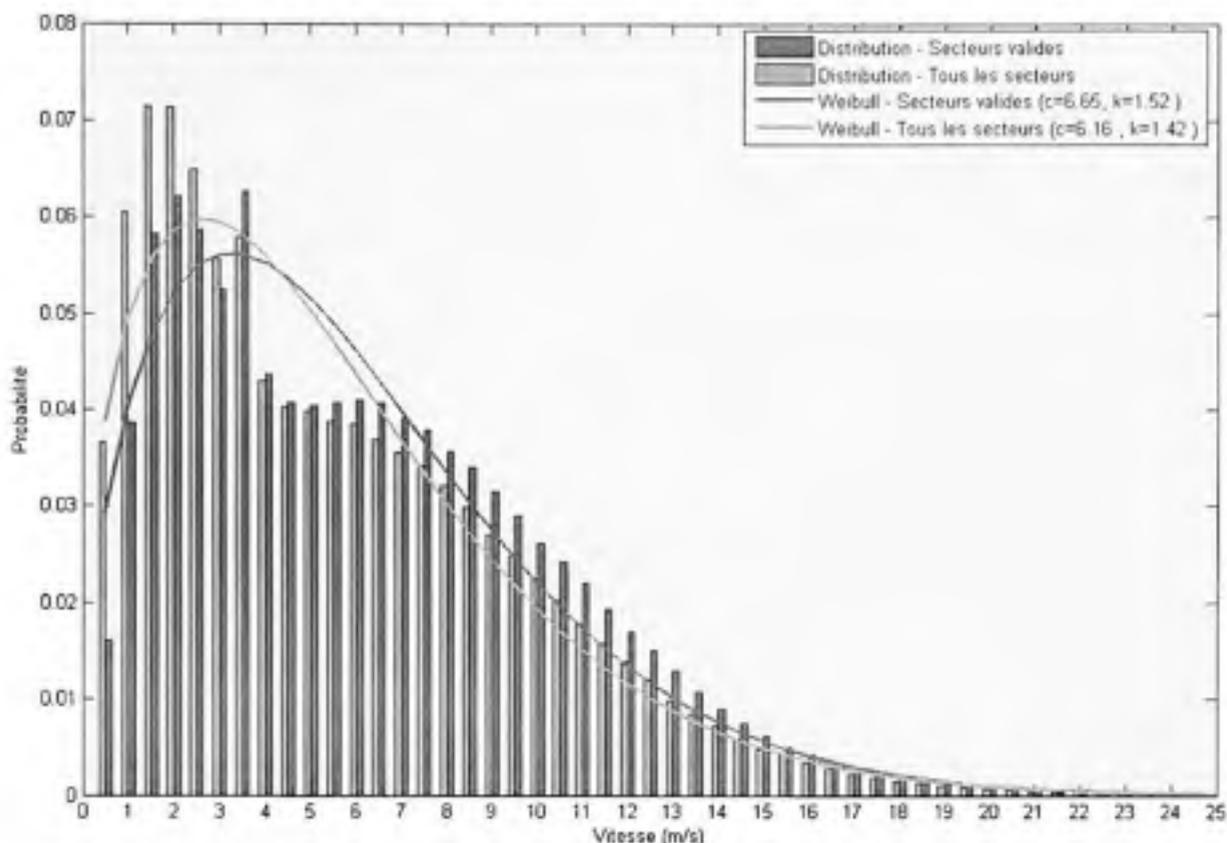


Figure 5.7 – Distribution et courbe de Weibull pour le site de Cap-Chat.

On remarque en premier lieu, une augmentation de la proportion de faibles vitesses lorsque l'on traite l'ensemble des secteurs. Cette augmentation est probablement due à l'impact des turbines (sillage) sur la vitesse de l'écoulement de l'air dans certaines directions. On peut affirmer qu'aucun des deux cas ne parvient à caractériser fidèlement la distribution des vitesses sur le site. En traitant uniquement les secteurs valides, on néglige entre 17% et 29% des données dont on ignore la vitesse réelle.

On remarque également une surreprésentation de vitesses faibles pour le site de Cap-Chat [42]. On pourrait s'attendre à une distribution similaire, entre les deux sites, puisque les sites de Matane et de Cap-Chat sont distants d'environ 70 km. Cette différence s'explique, peut-être en partie, par l'*effet Chic-Chocs*, un phénomène décrit par Choïnard [46]. Selon ce dernier, la présence de la chaîne de montagnes des

Chic-Chocs, entraîne une diminution marquée de la vitesse des vents sur le site de Cap-Chat et affecte grandement la performance du parc éolien [47].

CHAPITRE 6

IDENTIFICATION DES ÉVÉNEMENTS DE GIVRE

Ce chapitre présente les principaux résultats permettant d'identifier les périodes de givre. Dans le but de faciliter la lecture et la compréhension de ce rapport, il se peut que certains résultats pertinents, mais non essentiels, soient présentés en annexe plutôt que dans ce chapitre.

6.1 Phénomènes givrants potentiels

Les outils présentés à la *section 4* permettent, tout au plus, d'identifier des événements potentiels de givre. Nous ferons ici, une revue des résultats obtenus à l'aide de chacun des outils développés.

6.1.1 Données historiques et informations visuelles (DHVIS)

Selon les observations visuelles notées à la station météorologique de Mont-Joli, il y a eu un total de 70 heures de conditions de pluie verglaçante durant la période 2000-2003. On peut séparer ces 70 heures en 21 événements. Pour ces épisodes de givre, les valeurs moyennes de température, d'humidité relative, de vitesse des vents et de directions des vents sont présentées dans le *Tableau 6.1*.

Tableau 6.1

Moyenne des paramètres météorologiques (Mont-Joli, 2000-2003)

Moyenne (Mont-Joli, 2000-2003)			
Température (°C)	Humidité relative (%)	Vitesse (m/s)	Direction (°)
-1.15	91.66	4.93	084

La durée des événements varie d'un minimum de 1 heure à un maximum de 9 heures. Trois événements ont eu lieu durant l'année 2000, quatre durant l'année 2001, cinq

durant l'année 2002 et finalement, neuf événements ont lieu au cours de l'année 2003. Le *Tableau 6.2* présente ces épisodes de pluie verglaçante.

Tableau 6.2
Événements de pluie verglaçante (Mont-Joli, 2000-2003)

Nom	Date	t (h)	T (°C)	HR (%)	U (m/s)	Dir (°)	PR (°)
DHVIS-1	04/01/00, 13:00	6	-5.65	88.50	2.64	067	-7.23
DHVIS-2	09/03/00, 16:00	3	-0.93	86.00	7.86	347	-3.03
DHVIS-3	17/12/00, 06:00	6	-0.95	80.67	6.92	130	-3.85
DHVIS-4	10/02/01, 04:00	3	-1.73	85.00	6.11	127	-3.93
DHVIS-5	30/11/01, 19:00	9	-0.56	97.56	4.23	053	-0.89
DHVIS-6	01/12/01, 05:00	1	0.20	100.00	1.67	040	0.20
DHVIS-7	24/12/01, 21:00	5	-0.04	96.40	4.67	044	-0.50
DHVIS-8	03/03/02, 07:00	3	0.23	84.67	4.81	157	-2.03
DHVIS-9	09/03/02, 15:00	3	-3.07	86.00	2.22	073	-5.03
DHVIS-10	19/12/02, 20:00	1	-3.60	71.00	1.67	200	-8.00
DHVIS-11	20/12/02, 11:00	8	-0.39	85.38	4.06	044	-2.58
DHVIS-12	31/12/02, 22:00	1	-4.40	90.00	0.00	000	-5.80
DHVIS-13	21/03/03, 16:00	1	-0.90	100.00	5.56	050	-0.90
DHVIS-14	05/11/03, 09:00	1	-1.00	84.00	9.17	140	-3.30
DHVIS-15	17/12/03, 16:00	1	0.00	88.00	4.17	140	-1.80
DHVIS-16	24/12/03, 03:00	2	-0.65	100.00	3.61	065	-0.65
DHVIS-17	24/12/03, 17:00	7	-0.46	100.00	7.30	050	-0.46
DHVIS-18	25/12/03, 02:00	1	-0.30	100.00	5.28	050	-0.30
DHVIS-19	25/12/03, 22:00	5	-0.22	100.00	6.33	052	-0.22
DHVIS-20	26/12/03, 07:00	1	-0.30	100.00	4.17	050	-0.30
DHVIS-21	30/12/03, 17:00	2	-0.20	100.00	5.42	065	-0.20

Nous présentons également, voir la *Figure 6.1*, les conditions météorologiques enregistrées sur les sites de Matane et de Cap-Chat au moment où ont lieu les épisodes de pluie verglaçante. Le tableau de l'ensemble de ces données se trouve à l'*ANNEXE VI*. La *Figure 6.2* montre les conditions météorologiques enregistrées sur les sites de Matane et Cap-Chat au moment où ont lieu les épisodes de brouillard givrant. Le tableau de l'ensemble de ces données se trouve à l'*ANNEXE VI*.

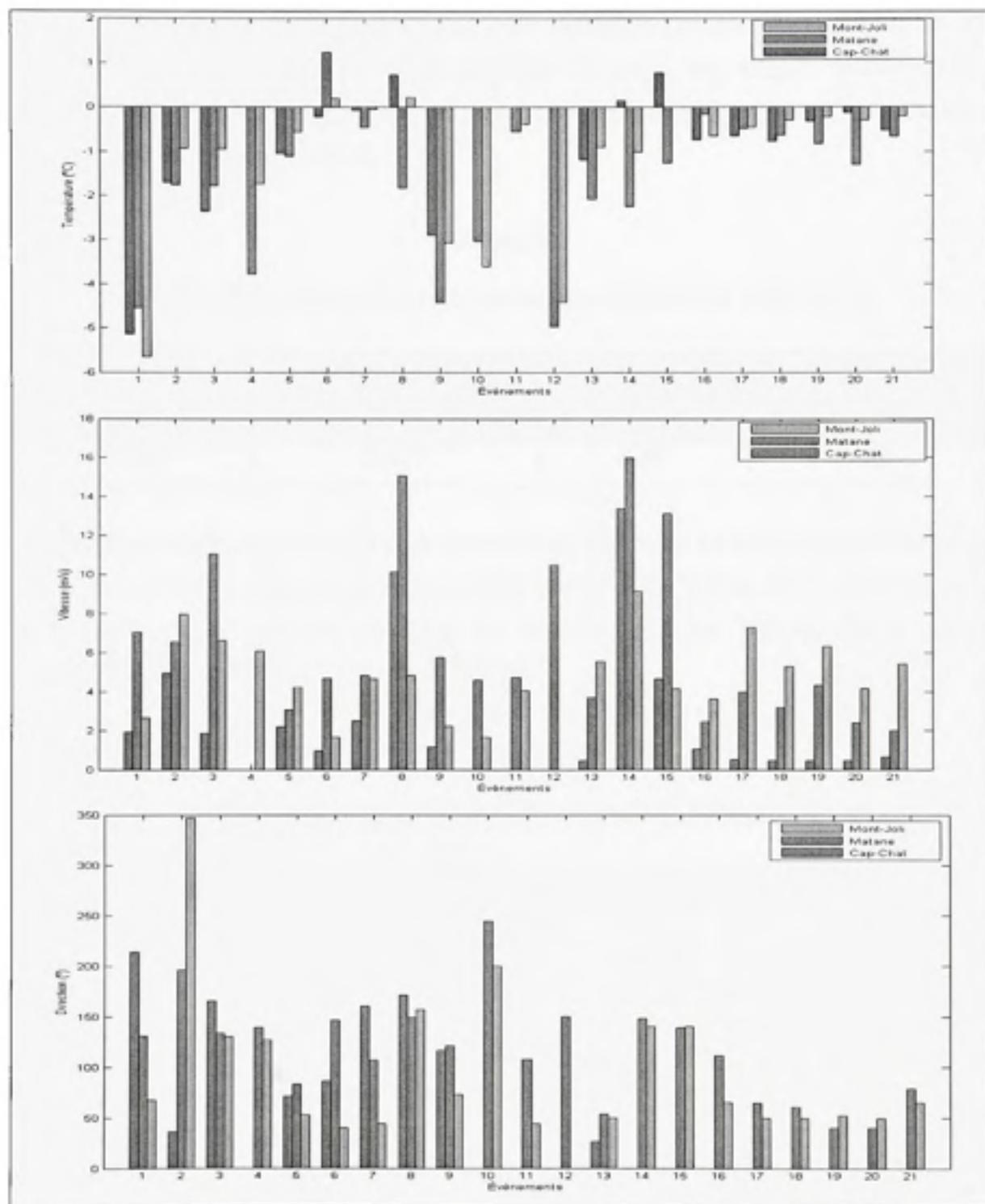


Figure 6.1 – Comparaison des paramètres météorologiques durant les épisodes de pluie verglaçante.

De la même façon, il est possible d'identifier les épisodes de brouillard givrant notés à la station de Mont-Joli. Neufs événements de brouillard givrant, pour un total de 22 heures, ont été identifiés. Pour ces épisodes de givre, les valeurs moyennes de température, d'humidité relative, de vitesse des vents et de directions des vents sont présentées dans le *Tableau 6.3*.

Tableau 6.3

Moyenne des paramètres météorologiques (Mont-Joli, 2000-2003)

Moyenne (Mont-Joli, 2000-2003)			
Température (°C)	Humidité relative (%)	Vitesse (m/s)	Direction (°)
-1.07	99.77	3.07	124

La durée des événements varie d'un minimum de 1 heure à un maximum de 8 heures. Un événement a eu lieu durant l'année 2000, deux durant l'année 2002, et finalement, 6 événements ont eu lieu au cours de l'année 2003. Le *Tableau 6.4* présente l'ensemble des épisodes de brouillard givrant.

Tableau 6.4

Événements de brouillard givrant (Mont-Joli, 2000-2003)

Nom	Date	t (h)	T (°C)	HR (%)	U (m/s)	Dir (°)	PR (°)
DHVIS-22	09/11/00, 06:00	1	-0.10	95.00	2.50	060	-0.80
DHVIS-23	27/02/02, 21:00	8	-1.40	100.00	3.16	219	-1.40
DHVIS-24	14/12/02, 21:00	3	-0.37	100.00	7.04	050	-0.37
DHVIS-25	24/03/03, 05:00	2	-4.20	100.00	1.81	185	-4.20
DHVIS-26	25/12/03, 08:00	4	-0.20	100.00	0.00	000	-0.20
DHVIS-27	25/12/03, 21:00	1	-0.40	100.00	5.28	050	-0.40
DHVIS-28	26/12/03, 16:00	1	-0.60	100.00	0.00	000	-0.60
DHVIS-29	30/12/03, 16:00	1	-0.10	100.00	6.67	060	-0.10
DHVIS-30	30/12/03, 23:00	1	-0.80	100.00	3.06	280	-0.80

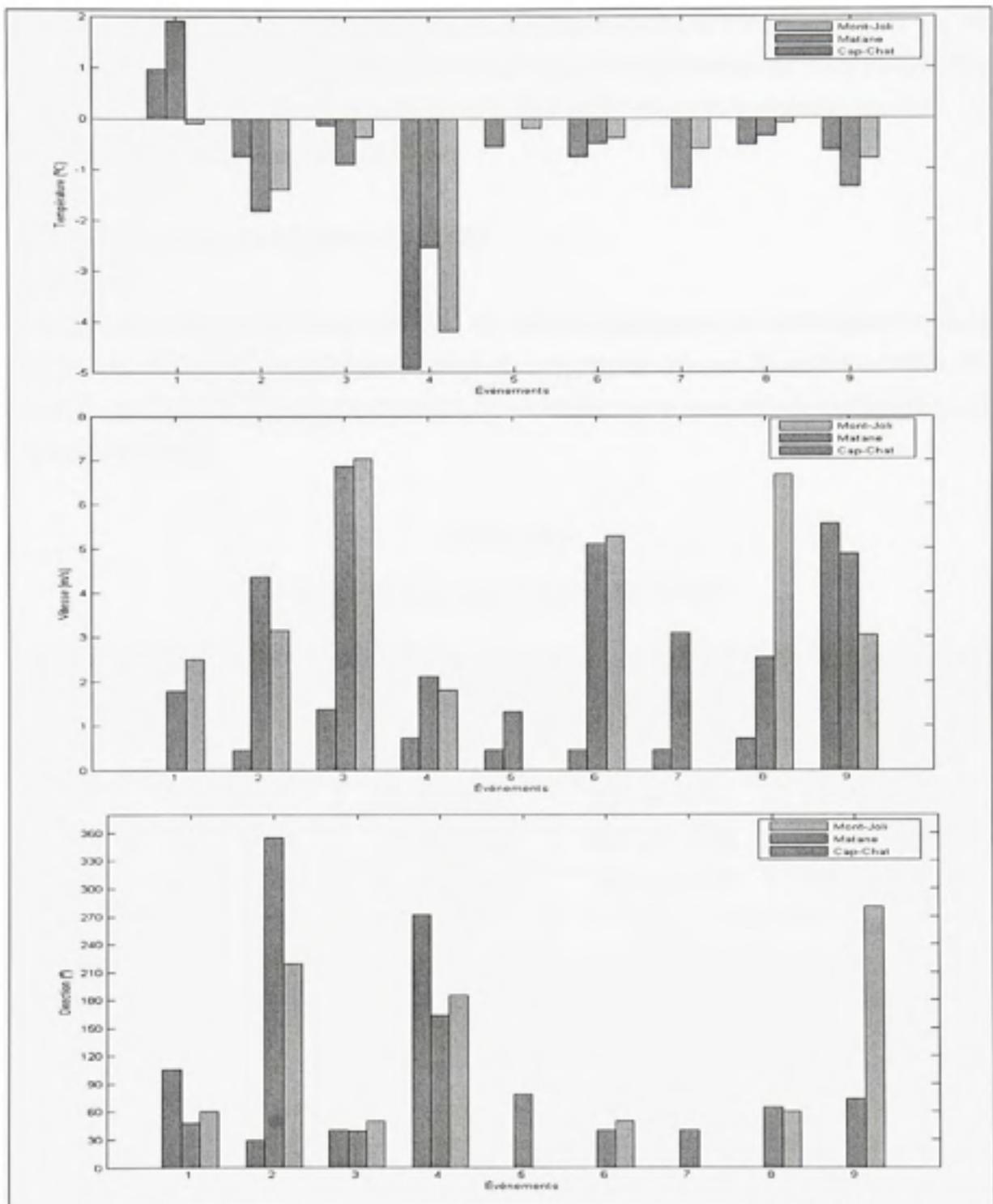


Figure 6.2 – Comparaison des paramètres météorologiques durant les épisodes de brouillard givrant.

On peut observer, sur ces figures, la variation des conditions météorologiques sur les trois sites. Il devient alors difficile de supposer que les événements de pluie verglaçante et de brouillard givrants s'étant produits à Mont-Joli, se sont également produits, au même instant, à Matane et à Cap-Chat.

6.1.2 Température et humidité (*DRHT*)

On sait que les brouillards givrants et les pluies verglaçantes se produisent toujours lorsque la température est sous le point de congélation et que l'humidité relative est élevée. Le *Tableau 6.5* montre la durée des conditions propices à la formation de givre sur les éoliennes.

Tableau 6.5
Durée (heures) des événements *DRHT*

Site de Matane				
Année	T <0°C, HR>95%	T <0°C, HR>90%	T <0°C, HR>85%	T <0°C, HR>80%
2000	232 (2.70%)	539 (6.28%)	814 (9.49%)	1139 (13.28%)
2001	126 (1.48%)	370 (4.34%)	694 (8.14%)	1017 (11.92%)
2002	295 (3.46%)	570 (6.69%)	864 (10.14%)	1241 (14.57%)
2003	386 (4.57%)	585 (6.92%)	820 (9.71%)	1089 (12.89%)
Total	1039	2063	3192	4486
Site de Cap-Chat				
Année	T <0°C, HR>95%	T <0°C, HR>90%	T <0°C, HR>85%	T <0°C, HR>80%
2000	34 (0.42%)	341 (4.25%)	659 (8.21%)	1081 (13.46%)
2001	114 (1.41%)	287 (3.55%)	595 (7.37%)	939 (11.63%)
2002	424 (5.08%)	703 (8.42%)	1074 (12.87%)	1562 (18.72%)
2003	153 (1.89%)	285 (3.53%)	513 (6.35%)	766 (9.49%)
Total	725	1616	2840	4342

Pour la première définition ($T < 0^{\circ}\text{C}$ et $HR > 95\%$), on remarque que ces conditions existent, selon l'année, entre 0.42% et 5.08% du temps. Pour la quatrième définition ($T < 0^{\circ}\text{C}$ et $HR > 80\%$), la proportion varie plutôt de 9.49% à 18.72%. Le *Tableau 6.6* montre les conditions moyennes de température et de vitesse des vents observées durant ces événements pour la période 2000-2003. Ce tableau semble indiquer que plus l'humidité relative est élevée, plus la température doit se rapprocher du point de congélation pour qu'un événement givrant se produise.

Tableau 6.6

Conditions moyennes des événements *DRHT*

Matane		
Conditions	T ($^{\circ}\text{C}$)	Vitesse (m/s)
T $< 0^{\circ}\text{C}$, HR $> 95\%$	-2.65	5.86
T $< 0^{\circ}\text{C}$, HR $> 90\%$	-4.12	5.89
T $< 0^{\circ}\text{C}$, HR $> 85\%$	-4.84	5.99
T $< 0^{\circ}\text{C}$, HR $> 80\%$	-5.24	6.18
Cap-Chat		
Conditions	T ($^{\circ}\text{C}$)	Vitesse (m/s)
T $< 0^{\circ}\text{C}$, HR $> 95\%$	-1.93	4.60
T $< 0^{\circ}\text{C}$, HR $> 90\%$	-2.74	4.68
T $< 0^{\circ}\text{C}$, HR $> 85\%$	-3.96	4.84
T $< 0^{\circ}\text{C}$, HR $> 80\%$	-4.86	5.15

On tente finalement de vérifier si la direction a une influence sur la fréquence de ces événements. On peut en effet supposer que le fleuve St-Laurent aura une influence sur la fréquence de ces événements. La *Figure 6.3* et la *Figure 6.4* illustrent la fréquence des événements selon la direction pour les deux sites. Bien que les conditions propices existent pour toutes les directions de vent, on remarque sur ces deux figures, une surreprésentation des secteurs variant du nord à l'est. On voit également que la distribution selon la direction se rapproche de la normale lorsque la valeur de l'humidité relative diminue.

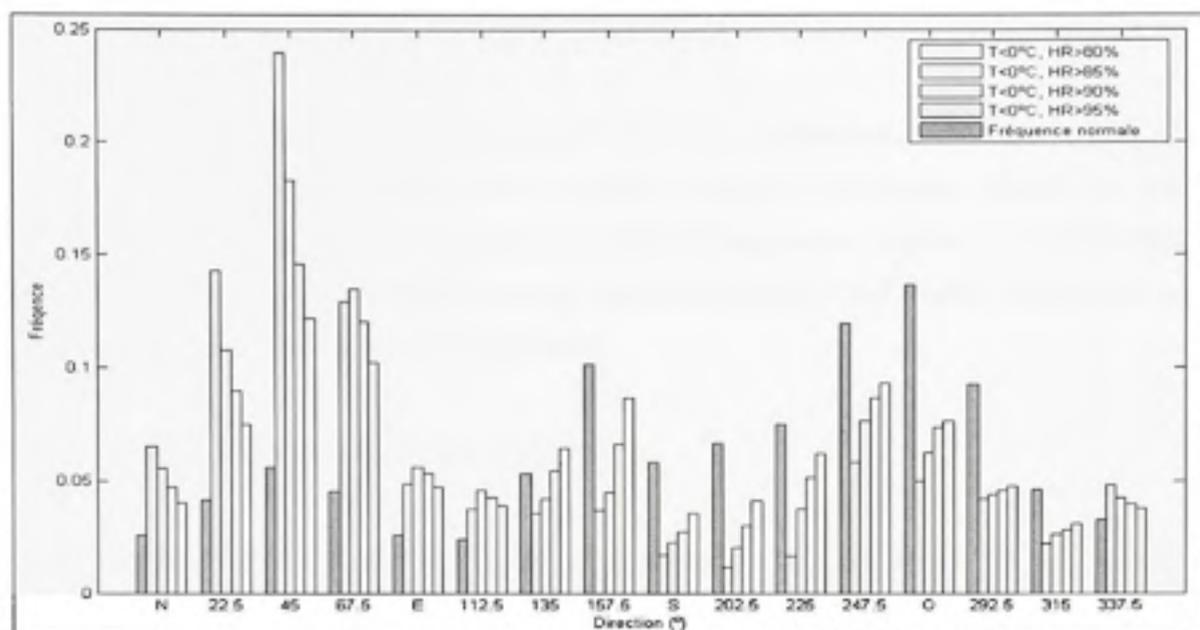


Figure 6.3 – Conditions propices au givrage selon la direction, Matane 2000-2003.

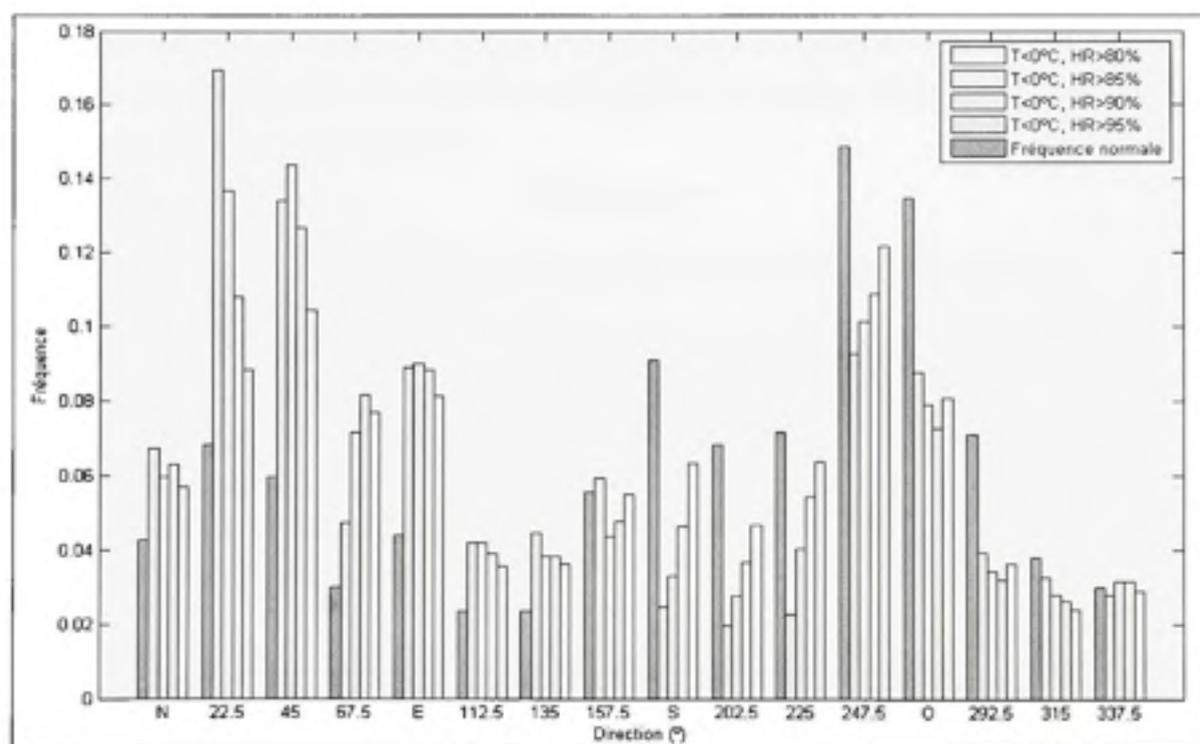


Figure 6.4 – Conditions propices au givrage selon la direction, Cap-Chat 2000-2003.

6.1.3 Précipitation liquide par temps froid (DPL)

Après analyse des données, il apparaît que cet indicateur n'est pas fiable. Le comportement du détecteur de pluie semble suspect, du moins, durant les mois hivernaux. De la pluie est régulièrement détectée jusqu'à des valeurs de températures situées sous la barre des -20°C . En raison de ce comportement, nous n'utiliserons pas cet indicateur dans le cadre de ce mémoire.

6.1.4 Codes d'erreur de l'éolienne (DCE)

Nous analysons dans un premier temps les codes d'erreur des éoliennes de référence. Afin d'identifier les événements de givre, nous nous concentrons sur les quatre codes d'erreur identifiés dans notre méthodologie. On note que le code d'erreur 1061 (*anémomètre défectueux*) apparaît lors que la puissance produite est inférieure à 1 kW, mais que la vitesse du vent est supérieure à 8 m/s. Le code d'erreur 1062 (*anémomètre défectueux*) apparaît quant à lui lorsque la puissance produite est supérieure à 100 kW alors que la vitesse du vent est inférieure à 3 m/s. Le *Tableau 6.7* montre la fréquence de chacun de ces codes d'erreur.

Tableau 6.7

Fréquence des codes d'erreur des turbines de référence (occurrences)

	Matane			
	2000	2001	2002	2003
1025 - Vibrations	0	0	0	0
1026 – Arrêt d'urgence	0	0	0	0
1061 – Anémomètre défectueux	0	0	0	0
1062 – Anémomètre défectueux	0	0	0	0
	Cap-Chat			
	2000	2001	2002	2003
1025 - Vibrations	0	0	0	0
1026 – Arrêt d'urgence	0	1	0	0
1061 – Anémomètre défectueux	0	0	0	0
1062 – Anémomètre défectueux	0	0	0	0

Ces codes d'erreur apparaissent une seule fois pour les deux éoliennes de références et il est donc impossible de tirer des conclusions quant aux événements de givre. C'est pourquoi dans un deuxième temps, nous répétons cet exercice pour l'ensemble des éoliennes. Nous obtenons ainsi un plus large éventail de données permettant de réaliser différentes analyses de distribution. Le *Tableau 6.8* montre à nouveau, la fréquence des codes d'erreur, mais pour l'ensemble des éoliennes.

Tableau 6.8

Fréquence des codes d'erreur des turbines (occurrences)

	Matane			
	2000	2001	2002	2003
1025 - Vibrations	23	0	0	0
1026 – Arrêt d'urgence	818	185	470	163
1061 – Anémomètre défectueux	0	0	0	0
1062 – Anémomètre défectueux	96	65	150	250
	Cap-Chat			
	2000	2001	2002	2003
1025 - Vibrations	3	3	0	0
1026 – Arrêt d'urgence	1079	256	55	158
1061 – Anémomètre défectueux	0	0	0	0
1062 – Anémomètre défectueux	333	179	423	624

La *Figure 6.5* montre la distribution des codes d'erreur selon la période de l'année. Il est impossible de montrer la distribution selon la température parce que trop de données de température sont manquantes. On remarque sur cette figure, à l'exception des arrêts d'urgence pour le complexe de Cap-Chat, que les codes d'erreur apparaissent principalement durant les mois hivernaux.

De son côté, la *Figure 6.6* montre la distribution selon l'orientation de l'éolienne. On voit sur cette figure que la majorité des codes d'erreur se produisent lorsque le vent provient principalement du nord et cela, pour les deux sites.

Il est intéressant de noter que tous les codes d'erreur ne vont pas nécessairement mener à l'arrêt de l'éolienne. C'est évidemment le cas pour le code d'erreur apparaissant pour les arrêts d'urgence, mais dans les cas des erreurs liées au fonctionnement de l'anémomètre on observe rarement un arrêt de l'éolienne.

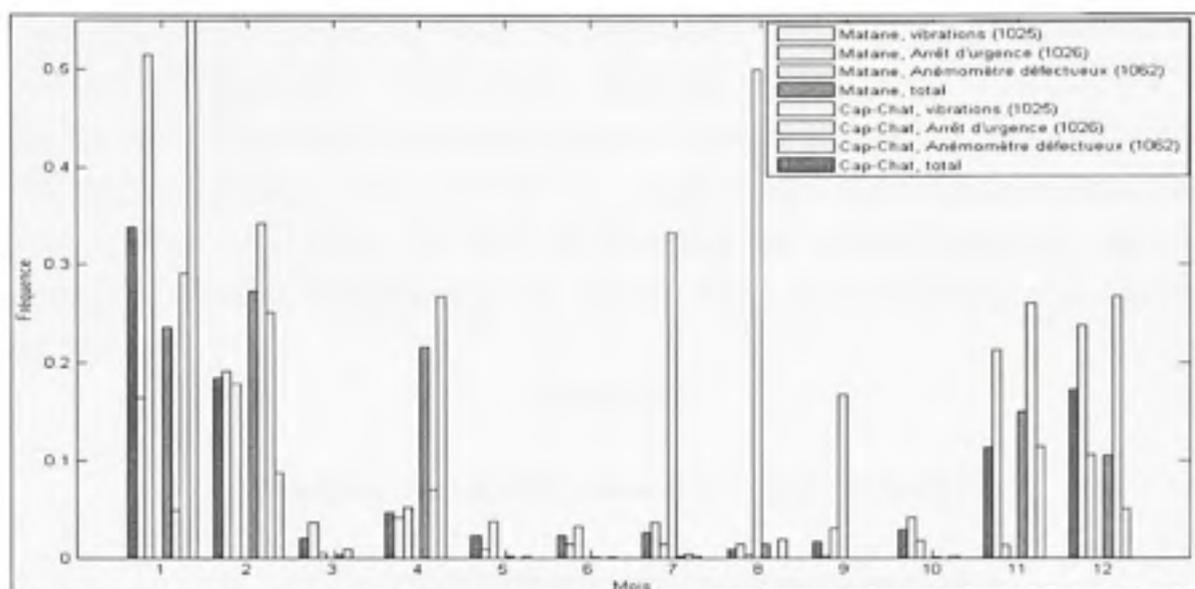


Figure 6.5 – Distribution des codes d'erreur selon la période.

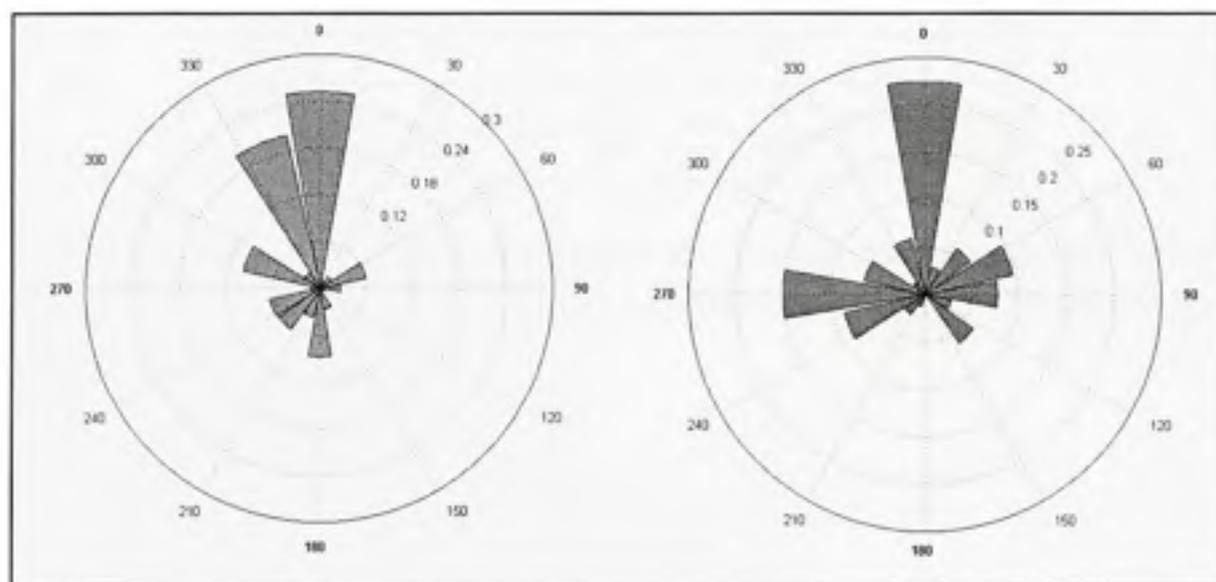


Figure 6.6 – Distribution selon la direction, Matane (gauche) et Cap-Chat (droite).

6.1.5 Comparaison entre un anémomètre chauffé et non chauffé (DACNC)

Nous identifions, dans un premier temps, les couples de vitesses situés à l'extérieur de limites identifiées en fonction de la dispersion (*Min & Max*). On tient uniquement compte de la direction, et non de la disponibilité, pour l'identification de ces données. En effet, les résultats sont faussés en raison du faible nombre de données dans certains des secteurs non disponibles. Les données suspectes ont été obtenues uniquement en utilisant les données pour lesquelles la plage de vitesse de vent mesurée à la tour de référence est comprise entre 1.25 m/s et une valeur supérieure limite contenant 95% des données. Le *Tableau 6.9* décrit la fréquence des valeurs suspectes. Tel que mentionné dans la méthodologie, les valeurs nulles sont identifiées puis traitées séparément.

Tableau 6.9

Fréquence (heures) des mesures de vitesse suspectes

	<i>Min & Max</i>		<i>Nulles</i>	
	Matane	Cap-Chat	Matane	Cap-Chat
2000	90	28	5	5
2001	85	28	5	26
2002	34	30	3	27
2003	52	46	16	11
Total	261	157	29	69

On évalue d'abord l'impact de la direction du vent sur la fréquence des valeurs suspectes. La *Figure 6.7* montre, pour les deux sites, la distribution des valeurs suspectes.

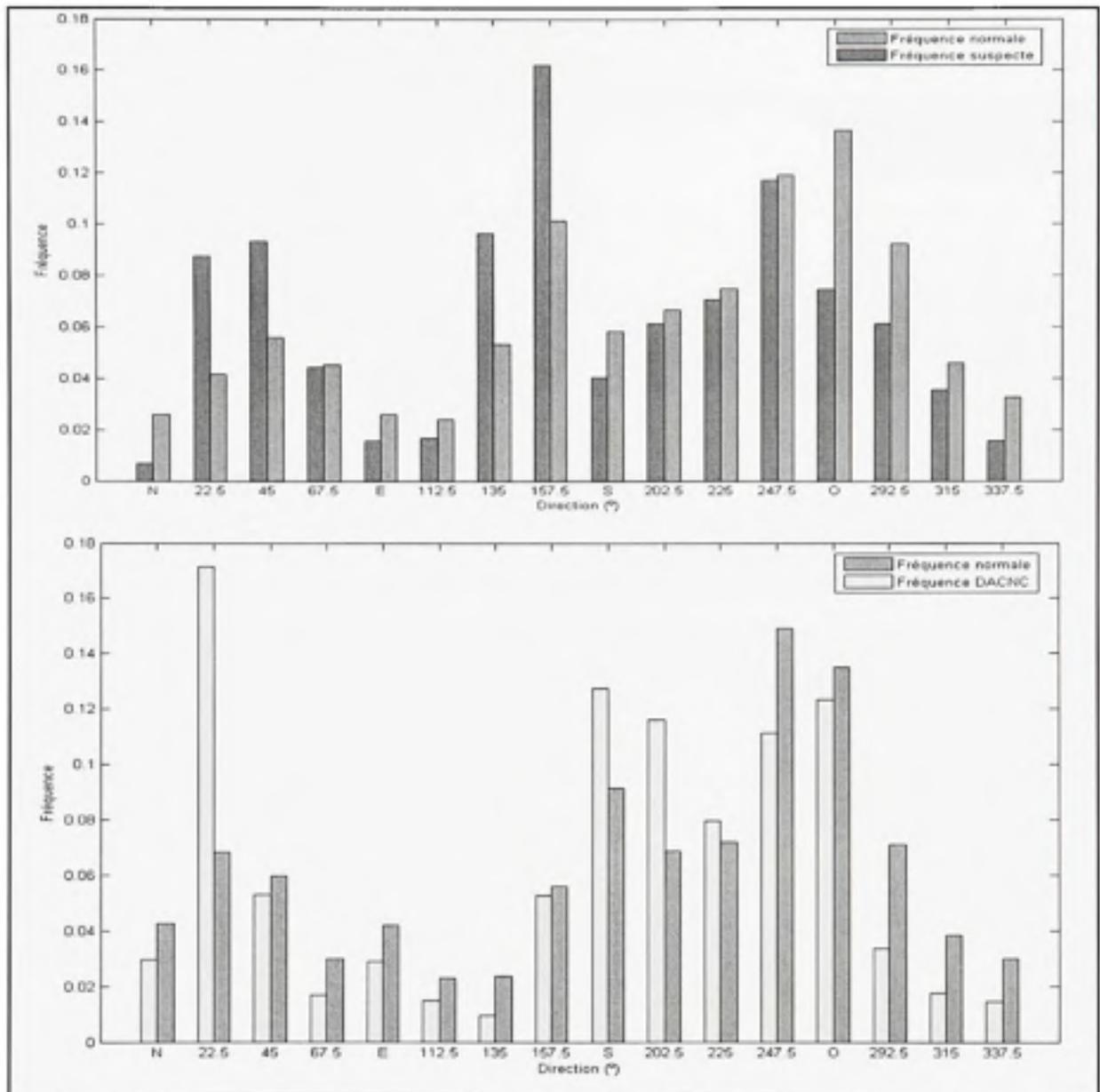


Figure 6.7 – Distribution des valeurs suspectes pour Matane (haut) et Cap-Chat (bas).

On ne note pas d'écart majeur pas rapport à la distribution normale sur le précédent graphique, et il est impossible de supposer que le nombre de valeurs suspectes est fonction de la direction.

On tente également d'évaluer, voir la *Figure 6.8*, la fréquence des valeurs suspectes en fonction de la température.

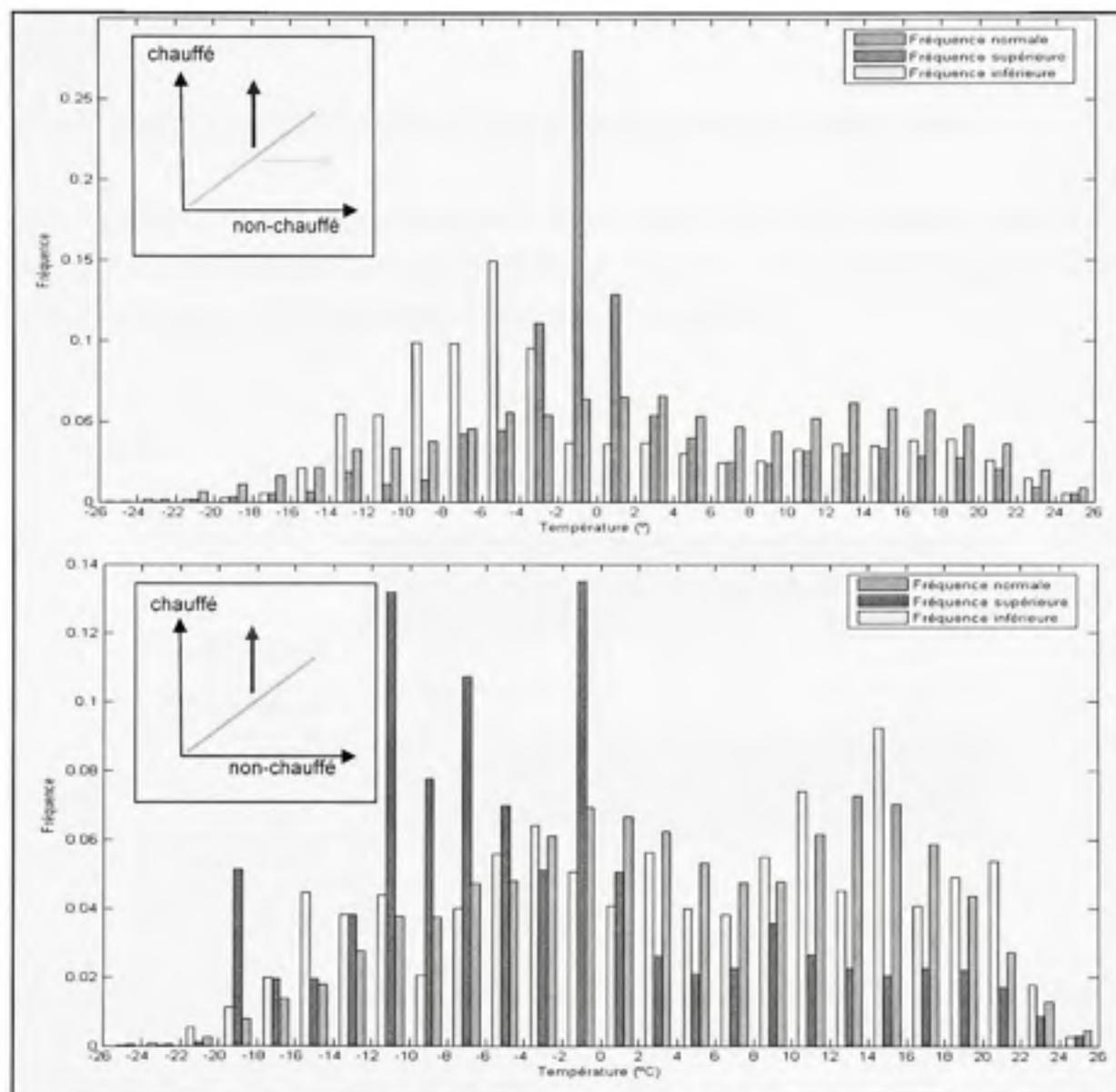


Figure 6.8 – Distribution des valeurs suspectes pour Matane (haut) et Cap-Chat (bas).

On remarque sur ces figures qu'il y a une surreprésentation de données dont la température se situe sous le point de congélation. Pour le site de Matane, 52% des données de la plage supérieures se situent entre -4°C et 2°C , alors que 59% des

données de la plage inférieures sont situées entre -14°C et 0° . Pour le site de Cap-Chat, la distribution des données de la plage inférieure suit de près la distribution normale. Les données de la plage supérieure, se situent, dans 58% des cas, entre -2°C et -12°C .

6.1.6 Lecture erronée sur un anémomètre/girouette non chauffé (DAE)

Nous évaluons ici, le comportement de l'anémomètre et de la girouette non chauffé et tentons d'en déduire les périodes de givre. Le *Tableau 6.10* montre la fréquence des vitesses suspectes et la fréquence des directions suspectes.

Tableau 6.10

Fréquence (heures) des données suspectes (DAE)

	Matane			
	2000	2001	2002	2003
Anémomètre	55	14	38	20
Girouette	20	20	35	36
	Cap-Chat			
	2000	2001	2002	2003
Anémomètre	1	2	33	309
Girouette	54	10	55	38

La *Figure 6.9* montre la distribution selon la température alors que la *Figure 6.10* montre la distribution selon la direction.

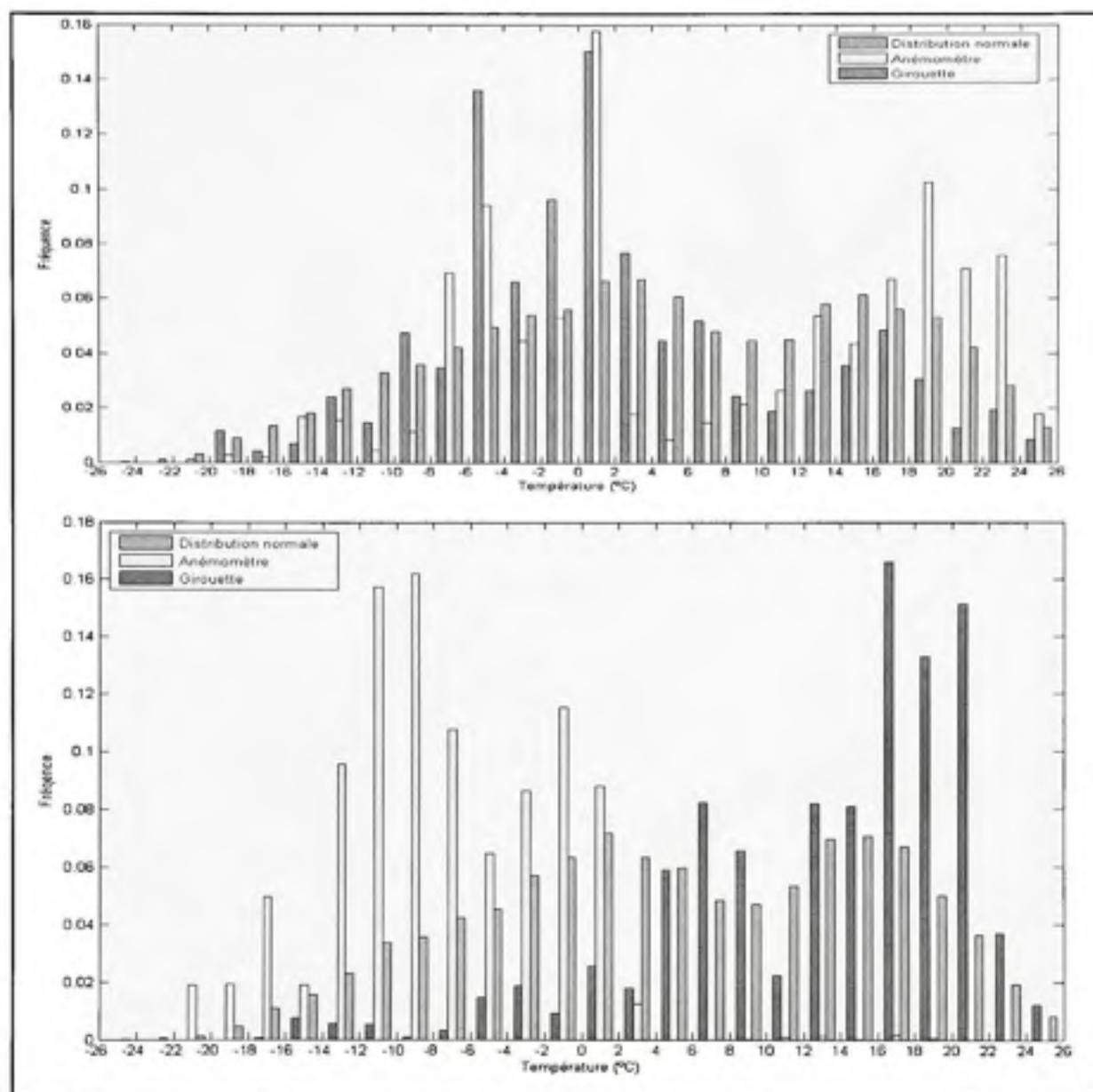


Figure 6.9 – Distribution selon la température, Matane (haut) et Cap-Chat (bas).

On observe sur la figure précédente des informations relativement contradictoires. À Matane, il y a une surreprésentation des données suspectes pour les températures près de ou inférieures au point de congélation. On observe également une surreprésentation des données où le comportement de l'anémomètre est suspect, et cela, pour des températures élevées. On observe plutôt l'inverse pour le site de Cap-Chat.

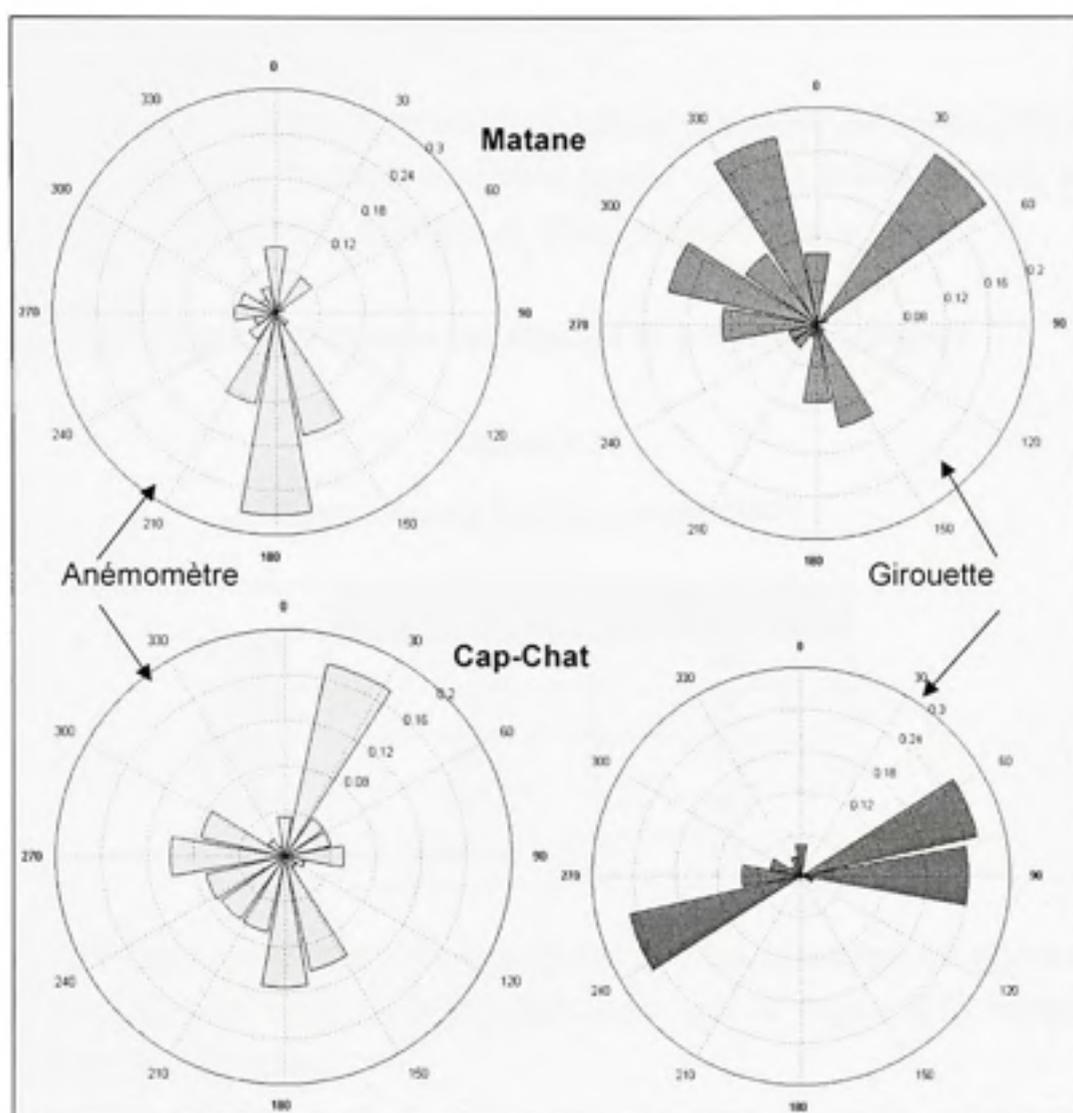


Figure 6.10 – Distribution selon la direction.

La figure précédente n'amène pas d'information claire permettant de caractériser les données suspectes. On observe plutôt des directions principales différentes pour l'anémomètre et la girouette.

6.1.7 Puissance inférieure à la normale (DPIP)

Nous présentons ici les résultats provenant du dernier outil d'analyse des données. Les données ont été traitées tel que décrit dans la section relative à la méthodologie. Nous avons également tenu compte de l'angle de calage qui varie dans le temps.

Le *Tableau 6.11* montre la fréquence des données de puissance anormales.

Tableau 6.11

Durée (heures) des événements *DPIP*

	<i>Matane</i>	<i>Cap-Chat</i>
2000	50	28
2001	73	37
2002	32	67
2003	56	59
Total	211	191

Nous présentons à nouveau une analyse de ces données anormales. La *Figure 6.11* montre la distribution selon la température alors que la *Figure 6.12* montre la distribution selon la direction.

On observe, sur le premier graphique, une indication claire que les données suspectes apparaissent principalement à basse température. Ce phénomène s'observe avec la même clarté pour les deux sites. L'impact de la direction du vent apparaît moins clairement. Si pour le site de Matane, on observe une surreprésentation des directions variant du nord à l'est, nous sommes forcés de constater que ce n'est pas aussi clair pour le site de Cap-Chat. On rappellera que l'on observait sensiblement la même distribution lors de l'étude de la température et de la densité (*DRHT*).

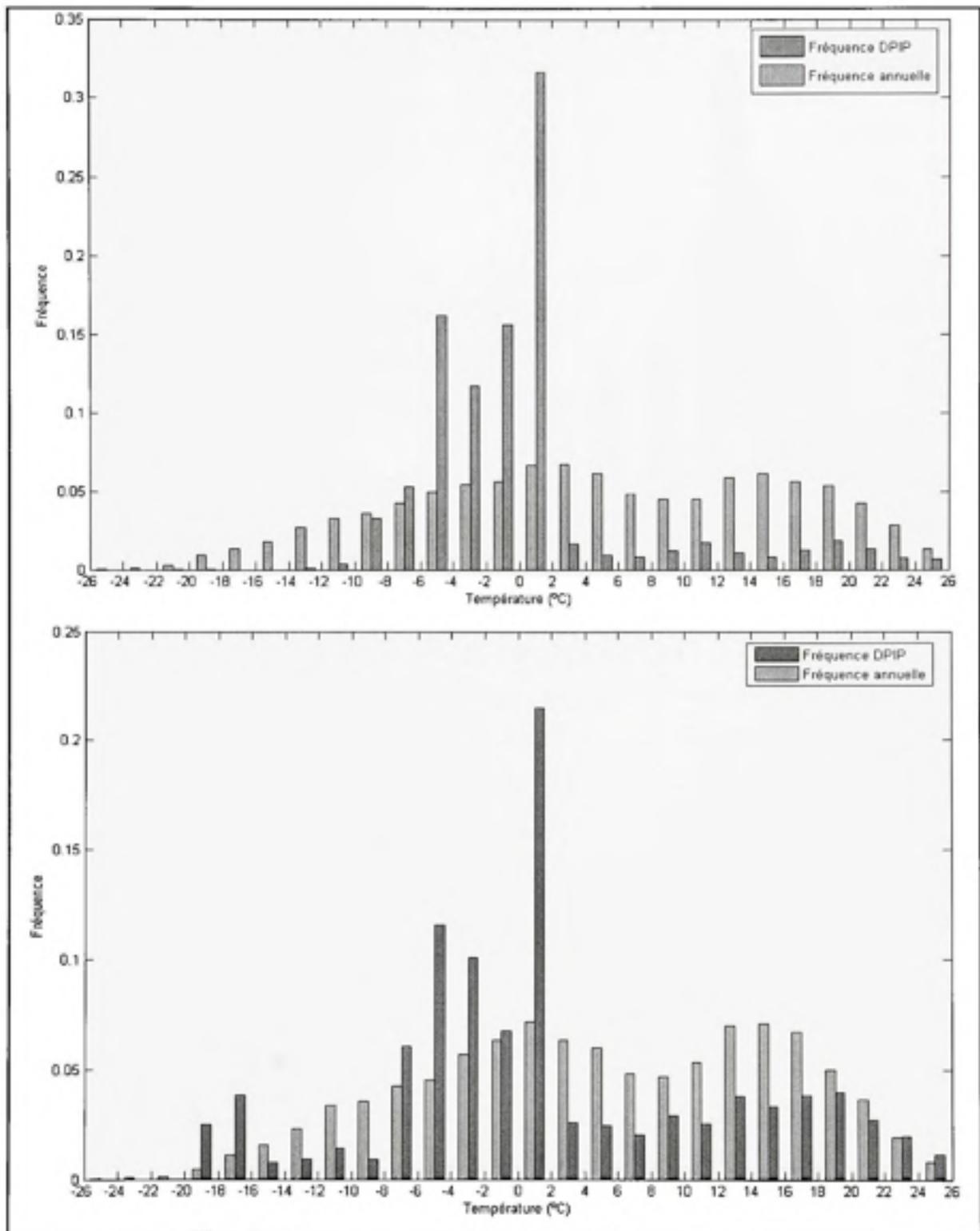


Figure 6.11 – Distribution des valeurs DPIP pour Matane (haut) et Cap-Chat (bas).

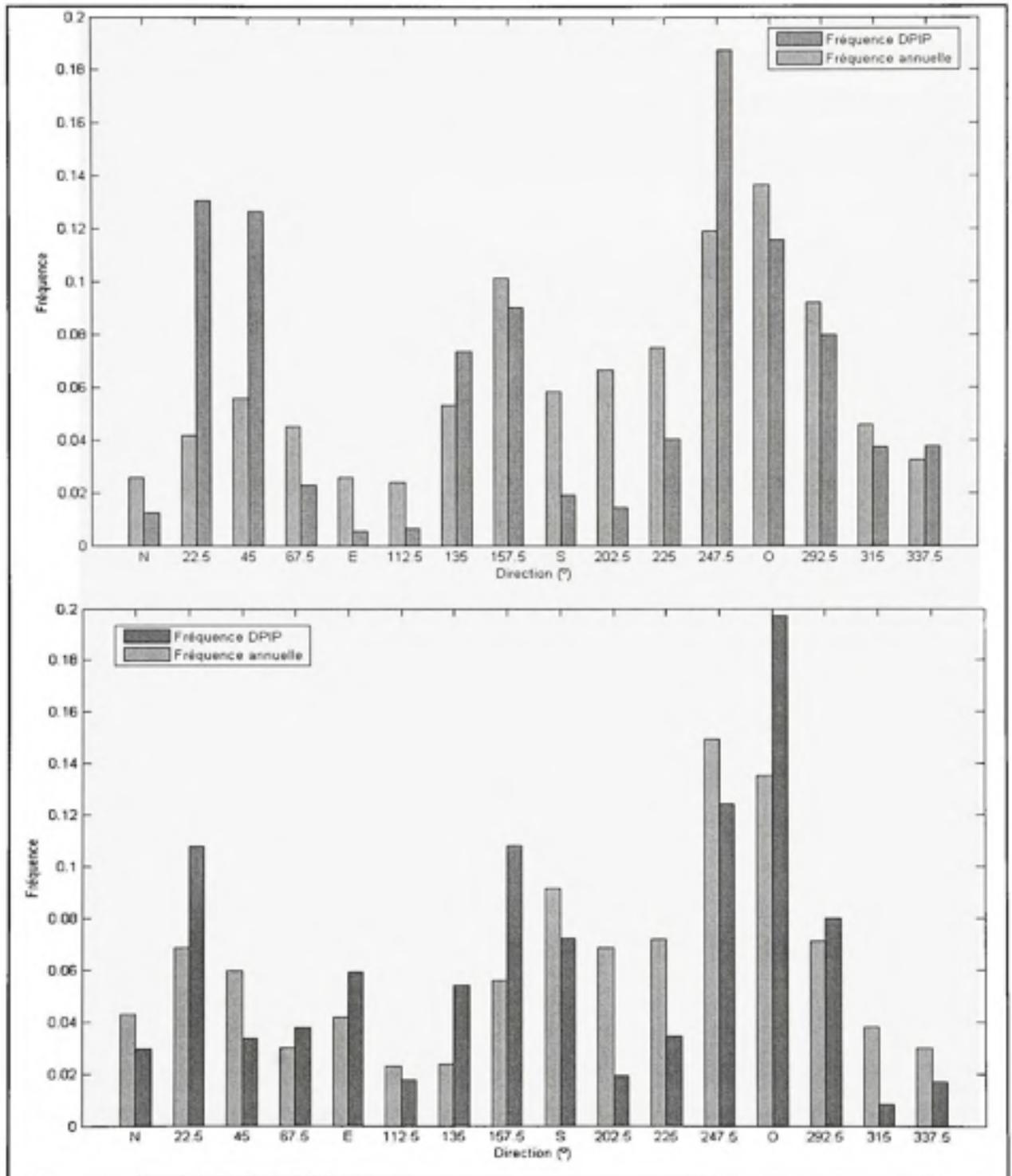


Figure 6.12 – Distribution des valeurs DPIP pour Matane (haut) et Cap-Chat (bas).

6.2 Identification et caractérisation des phénomènes givrants

Nous avons identifié un nombre important d'événements de givre potentiels à la section précédente. Malheureusement, une inspection sommaire des résultats indique qu'aucun des sept outils développés n'est parfaitement fiable pour identifier les périodes de givrage réelles.

Pour y parvenir, nous superposons toute l'information recueillie afin de visualiser les informations concordantes. Nous traçons parallèlement à ces informations, la variation de la puissance et de la vitesse du vent afin d'obtenir un portrait des conditions d'opération avant, pendant et après les événements potentiels.

Nous détaillons maintenant chacun des événements de givre réel identifiés. On recense, pour le site de Matane, 23 événements pour un total de 308 heures. Pour le site de Cap-Chat, on compte 19 événements pour un total de 213 heures. Le *Tableau 6.12* et le *Tableau 6.14* résument les événements s'étant produits sur les deux sites. On y détaille les conditions moyennes durant les événements de givre : température (T), point de rosée (PR), humidité relative (H) pression atmosphérique (P), vitesse du vent à la nacelle (V), direction du vent (D) et finalement la durée totale (t_i) de l'événement de givre. Tel que mentionné à la *section 4.1*, il est difficile de faire la différence entre la durée totale de l'événement de givre et la durée de la condition givrante puisqu'il n'y a pas de givromètres installés sur les sites. La durée de l'événement de givre inscrite correspond donc à la durée de l'impact sur l'éolienne et inclus les périodes où l'éolienne est non disponible.

Le *Tableau 6.13* et le *Tableau 6.15* détaillent, pour les sites de Matane et de Cap-Chat, le type et l'impact de l'événement de givre (selon la nomenclature présentée à la *section 4.4*), les outils d'analyse utilisés pour identifier les événements de givre et tout autre commentaire pertinent.

Tableau 6.12

Événements de givre réels (site de Matane)

		Matane						
		Conditions moyennes						
No.	Date	T (°C)	PR (°C)	H (%)	P (kPa)	V (m/s)	D (°)	t ₁ (h)
MA-1	09-Mar-2000 16:40	-4.5	-8.0	76.7	988.1	8.53	303	7.0
MA-2	08-Avr-2000 14:00	-0.4	0.2	100.0	994.1	8.28	59	2.4
MA-3	23-Avr-2000 21:20	-0.2	0.4	99.8	992.6	10.99	36	15.4
MA-4	28-Oct-2000 13:20	-1.4	-4.1	74.7	998.8	17.56	26	18.0
MA-5	17-Dec-2000 06:10	-1.2	-2.5	81.9	995.1	13.35	136	7.5
MA-6	27-Dec-2000 04:50	-9.2	-11.6	86.9	983.9	11.29	244	9.4
MA-7	12-Avr-2001 22:10	-0.1	0.2	82.9	991.0	17.56	148	8.2
MA-8	09-Nov-2001 14:40	-0.9	-0.5	94.7	988.4	13.35	292	15.0
MA-9	25-Dec-2001 07:30	-4.7	-7.3	81.9	985.1	7.58	232	83.5
MA-10	21-Fev-2002 22:10	-4.8	-4.4	95.5	989.7	9.12	36	13.4
MA-11	27-Fev-2002 13:20	-2.5	-2.6	98.8	972.2	7.55	333	20.8
MA-12	03-Mar-2002 06:30	-1.2	-0.7	85.9	988.5	16.63	149	5.1
MA-13	10-Mar-2002 02:40	0.4	2.3	88.7	986.3	12.56	139	2.0
MA-14	01-Avr-2002 18:00	-0.4	0.6	100.0	981.5	12.81	145	8.5
MA-15	05-Nov-2003 07:20	-1.1	-1.1	88.1	999.1	14.90	153	7.4
MA-16	13-Nov-2003 12:00	0.0	0.1	99.9	964.1	10.20	56	8.0
MA-17	14-Nov-2003 05:10	-0.2	-0.3	95.1	956.2	7.14	240	10.6
MA-18	01-Dec-2003 17:50	-5.1	-7.0	85.2	980.9	9.26	322	2.7
MA-19	12-Dec-2003 09:00	-5.6	-9.7	73.2	980.3	17.85	260	17.4
MA-20	15-Dec-2003 15:20	-5.2	-4.4	98.8	989.3	10.57	39	8.7
MA-21	17-Dec-2003 19:50	0.8	0.3	87.6	983.1	13.41	137	4.0
MA-22	24-Dec-2003 23:00	-0.4	-0.2	100.0	989.6	6.02	56	27.0
MA-23	31-Dec-2003 00:00	-3.2	-3.8	89.4	982.3	13.82	290	7.0
Moyenne totale		-2.9	-4.0	88.4	985.1	10.54	179	13.4

Tableau 6.13

Commentaires sur les événements de givre réels (site de Matane)

Matane			
No.	Impacts	Outils utilisés	Commentaires
MA-1	[2, 1, 2]	DHVIS, DRHT, DPIP	
MA-2	[ND, 1, 2]	DRHT, DPIP, DCE	Brouillard et pluie à Mont-Joli.
MA-3	[3, 1, 2]	DRHT, DPIP, DACNC	Neige et brouillard à Mont-Joli.
MA-4	[2, 1, 2]	DPIP	Cet événement de givre apparaît sur toutes les éoliennes du parc.
MA-5	[2, 1, 2]	DHVIS, DPIP, DACNC	
MA-6	[2, 1, 2]	DPIP	Cet événement de givre apparaît sur toutes les éoliennes du parc.
MA-7	[2, 1, 2]	DPIP, DACNC	
MA-8	[3, 1, 2]	DRHT, DPIP, DACNC	Neige et brouillard à Mont-Joli.
MA-9	[2, 1, 2]	DHVIS, DPIP, DACNC	
MA-10	[3, 1, 2]	DRHT, DPIP, DACNC	
MA-11	[3, 1, 2]	DHVIS, DRHT, DPIP, DAE	
MA-12	[2, 1, 2]	DHVIS, DPIP, DACNC	
MA-13	[2, 1, 2]	DPIP	Cet événement est identifié en utilisant l'outil <i>DRHT</i> - ($T < 0^{\circ}\text{C}$, $HR > 90\%$)
MA-14	[3, 1, 2]	DRHT, DPIP, DACNC, DAE	
MA-15	[2, 1, 2]	DHVIS, DPIP, DACNC	
MA-16	[ND, 1, 2]	DRHT, DPIP, DACNC	
MA-17	[3, 1, 2]	DRHT, DPIP, DAE	
MA-18	[3, 1, 1]	DRHT, DPIP	Surproduction
MA-19	[ND, 1, 2]	DRHT, DPIP	Pluie, neige et brouillard à Mont-Joli.
MA-20	[3, 1, 1]	DRHT, DPIP	Surproduction
MA-21	[2, 1, 2]	DHVIS, DPIP, DACNC	
MA-22	[2, 1, 2]	DHVIS, DPIP, DAE, DCE	Il pourrait s'agir d'un mélange de pluie verglaçante et de brouillard givrant.
MA-23	[3, 1, 2]	DHVIS, DRHT, DPIP	

Tableau 6.14

Événements de givre réels (site de Cap-Chat)

		Cap-Chat						
		Conditions moyennes						
No.	Date	<i>T</i> (°C)	<i>PR</i> (°C)	<i>H</i> (%)	<i>P</i> (kPa)	<i>V</i> (m/s)	<i>D</i> (°)	<i>t₁</i> (h)
CC-1	11-Mai-2000 21:10	0.3	0.4	96.1	1000.1	7.98	38	3.0
CC -2	17-Nov-2000 22:50	-1.5	-1.7	85.0	988.5	14.73	268	10.9
CC -3	12-Dec-2000 16:50	-5.0	-4.6	91.2	979.1	12.93	293	1.9
CC -4	27-Dec-2000 02:20	-7.0	-7.9	84.5	988.1	10.01	238	7.2
CC -5	09-Nov-2001 21:20	-0.4	0.1	95.8	993.5	15.35	273	13.7
CC -6	28-Feb-2002 03:00	-5.5	-7.1	86.6	979.8	16.36	62	20.9
CC -7	03-Mar-2002 07:20	0.6	-2.1	80.1	1001.5	16.40	158	1.7
CC -8	27-Apr-2002 05:30	0.0	0.9	100.0	1004.0	13.41	253	5.7
CC -9	03-Mai-2002 14:40	0.7	1.4	100.0	985.5	9.97	38	1.9
CC -10	18-Nov-2002 05:40	-3.6	-4.2	90.2	996.6	11.85	131	28.5
CC -11	23-Nov-2002 16:00	-0.1	0.6	99.0	977.1	14.43	282	31.5
CC -12	03-Mar-2003 13:30	-16.6	-21.7	62.8	994.6	14.47	249	35.4
CC -13	31-Mar-2003 08:00	-4.4	-4.8	89.3	989.4	10.94	156	12.2
CC -14	05-Nov-2003 11:50	0.8	-0.2	94.8	1006.5	13.96	77	1.4
CC -15	14-Nov-2003 19:30	0.7	0.6	96.2	968.9	12.30	85	5.2
CC -16	01-Dec-2003 17:40	-3.7	-3.3	96.0	984.9	10.50	136	2.4
CC -17	12-Dec-2003 10:50	-0.6	-1.4	95.4	976.2	19.38	82	4.0
CC -18	15-Dec-2003 15:40	-4.6	-4.9	92.0	996.7	7.64	113	6.7
CC -19	26-Dec-2003 18:30	-4.2	-5.0	88.5	1001.7	9.70	153	19.7
Moyenne totale		-5.0	-6.1	87.1	989.8	13.20	189	11.2

Tableau 6.15

Commentaires sur les événements de givre réels (site de Cap-Chat)

Cap-Chat			
No.	Impacts	Outils utilisés	Commentaires
CC-1	[2, 1, 2]	DPIP	Cet événement de givre apparaît sur toutes les éoliennes du parc.
CC-2	[3, 1, 2]	DRHT, DPIP	
CC-3	[3, 1, 1]	DRHT, DPIP, DCE	Surproduction
CC-4	[3, 1, 2]	DPIP	Cet événement de givre apparaît sur toutes les éoliennes du parc.
CC-5	[3, 1, 2]	DRHT, DPIP	Neige et brouillard à Mont-Joli.
CC-6	[3, 1, 2]	DHVIS, DRHT, DPIP, DACNC, DAE	
CC-7	[2, 1, 2]	DHVIS, DPIP, DACNC	
CC-8	[3, 1, 2]	DRHT, DPIP	
CC-9	[ND, 1, 2]	DPIP	Cet événement de givre apparaît sur toutes les éoliennes du parc. Neige et brouillard à Mont-Joli.
CC-10	[ND, 1, 2] [ND, 2, 3]	DRHT, DPIP, DCE	Arrêt de production du au givrage. Code d'erreur = 1039. Neige et poudrière à Mont-Joli.
CC-11	[3, 1, 2]	DRHT, DPIP, DCE, DACNC	
CC-12	[ND, 1, 2]	DPIP, DACNC	Neige et poudrière à Mont-Joli.
CC-13	[ND, 1, 2]	DRHT, DPIP	<i>Incertain.</i>
CC-14	[2, 1, 2]	DHVIS, DPIP	
CC-15	[3, 1, 2]	DPIP	<i>Incertain.</i>
CC-16	[3, 1, 1]	DRHT, DPIP	Surproduction
CC-17	[ND, 1, 2]	DRHT, DPIP	Pluie, neige et brouillard à Mont-Joli.
CC-18	[3, 1, 1]	DRHT, DPIP, DCE	Surproduction
CC-19	[2, 1, 2]	DRHT, DPIP	Il pourrait s'agir d'un mélange de pluie verglaçante et de brouillard givrant.

La plupart des événements de givre ont été identifiés à partir de deux ou plusieurs outils d'analyse. Il existe toutefois, un certain nombre d'événements qui nous apparaissent plus incertains. Les événements *MA-4* et *MA-6* présentent tous les deux d'importantes baisses de performance semblables aux autres événements identifiés. Ces événements apparaissent sur la majorité des éoliennes du parc et nous les conservons dans notre liste des événements. La même logique a été utilisée pour les événements *CC-1*, *CC-4* et *CC-9*. Seuls les événements *CC-13* et *CC-15* nous semblent toujours incertains, mais néanmoins crédibles.

Nous devons également mentionner la difficulté d'identifier le début et la fin des événements de givre. Les durées inscrites sont relativement fiables et représentatives des événements, mais il a été impossible d'identifier les événements avec une précision absolue.

Quant aux types d'événements, nous les avons identifiés à partir des observations visuelles de pluies verglaçantes et de brouillards givrants notés à la station de Mont-Joli. Lorsque des événements de givre ont été identifiés sans avoir été notés à la station de Mont-Joli, nous avons observé les conditions atmosphériques durant l'événement. Pour certains événements, il a été impossible de proposer le type de l'événement avec suffisamment de confiance. Le *Tableau 6.16* résume le type et l'impact des événements de givre.

Il est intéressant de noter les ressemblances et les différences entre les deux sites. Nous observons que les événements conduisant à la sous-production sont majoritaires pour les deux sites. Seuls deux événements de surproduction ont été identifiés pour chacun des sites. Un seul événement a, quant à lui, provoqué l'arrêt de la turbine et il s'est produit à Cap-Chat. Il existe beaucoup moins de ressemblances au niveau du type d'événement. Pour le site de Cap-Chat, 82 heures d'événements demeurent indéfinies. Il est en effet difficile d'évaluer les conditions à Cap-Chat à partir des observations provenant de Mont-Joli en raison de la distance qui sépare les deux villes. Les pluies verglaçantes semblent se produire plus fréquemment sur le site de Matane. Finalement, on observe que la durée des événements identifiés est de

beaucoup supérieure à Matane qu'à Cap-Chat. Il est relativement difficile de déterminer la cause de cette différence.

Tableau 6.16

Types et impacts des événements de givre

	Matane		Cap-Chat	
	Nombre	Durée (h)	Nombre	Durée (h)
Pluies verglaçantes	11	179.1	4	25.8
Brouillard givrants	9	102.1	10	106.1
Indéfini	3	27.8	5	82.0
Sous-production	21	297.6	15	161.4
Surproduction	2	11.4	3	24.0
Arrêt de l'éolienne	0	0.0	1	28.5

Les quatre figures suivantes illustrent la distribution de la température, de l'humidité relative, de la vitesse et de la direction des vents pour les deux sites.

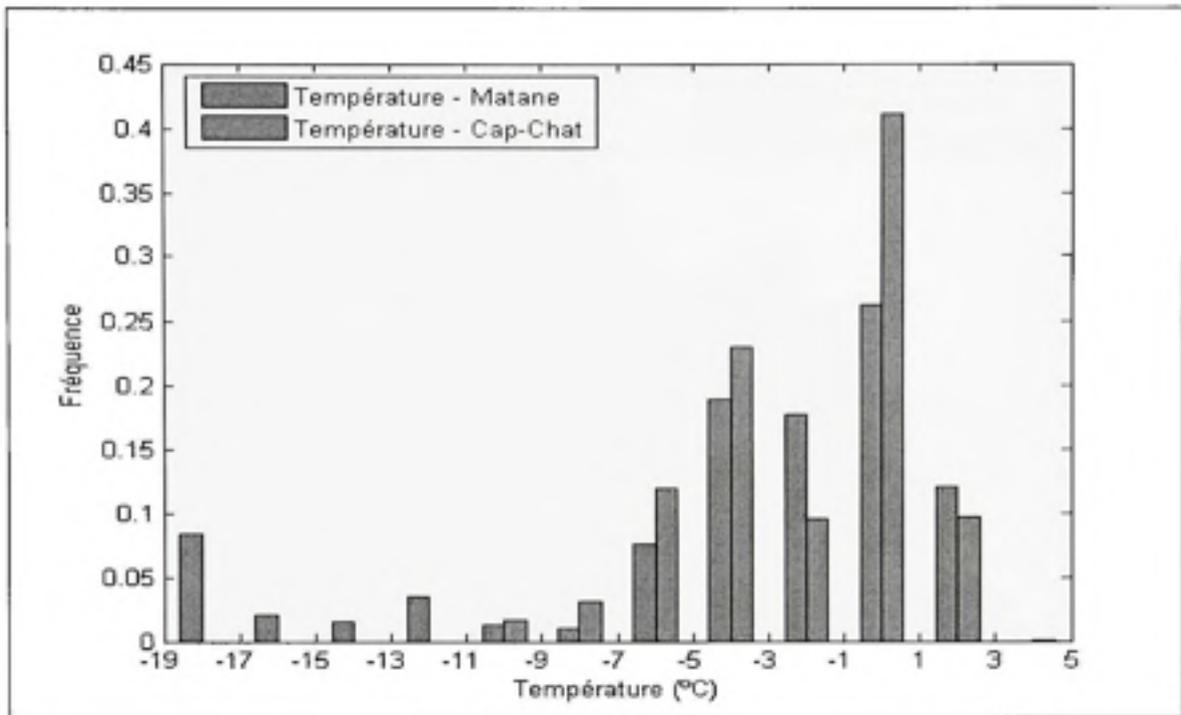


Figure 6.13 – Distribution de la température.

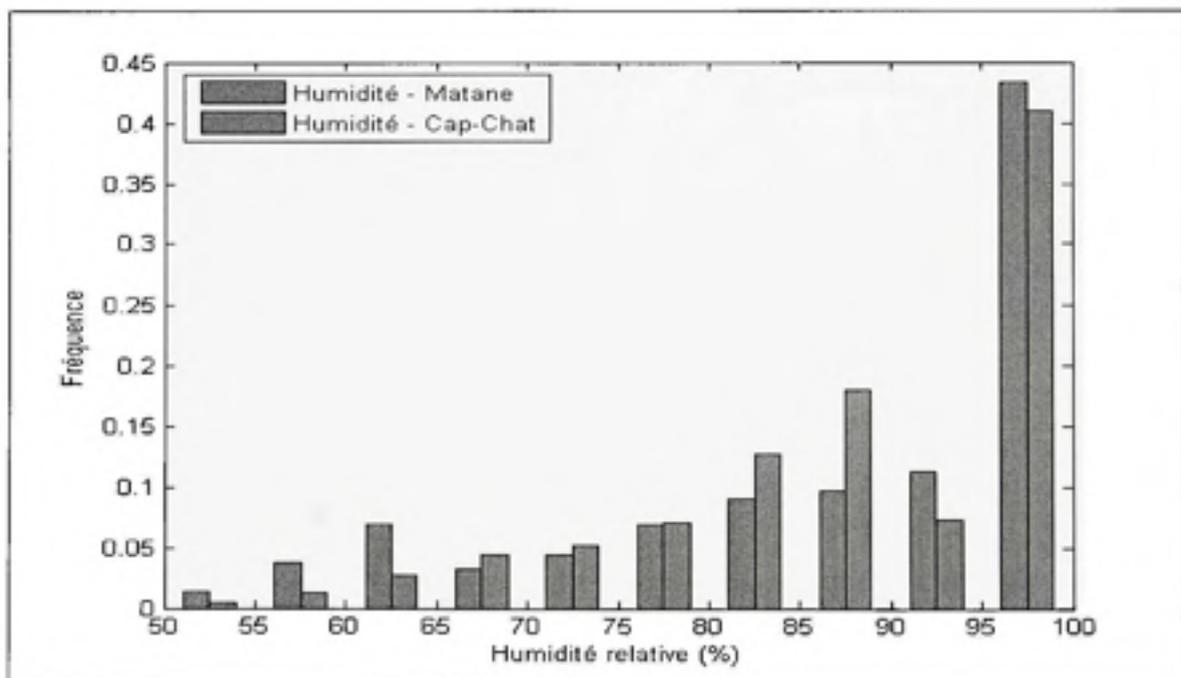


Figure 6.14 – Distribution de l'humidité relative.

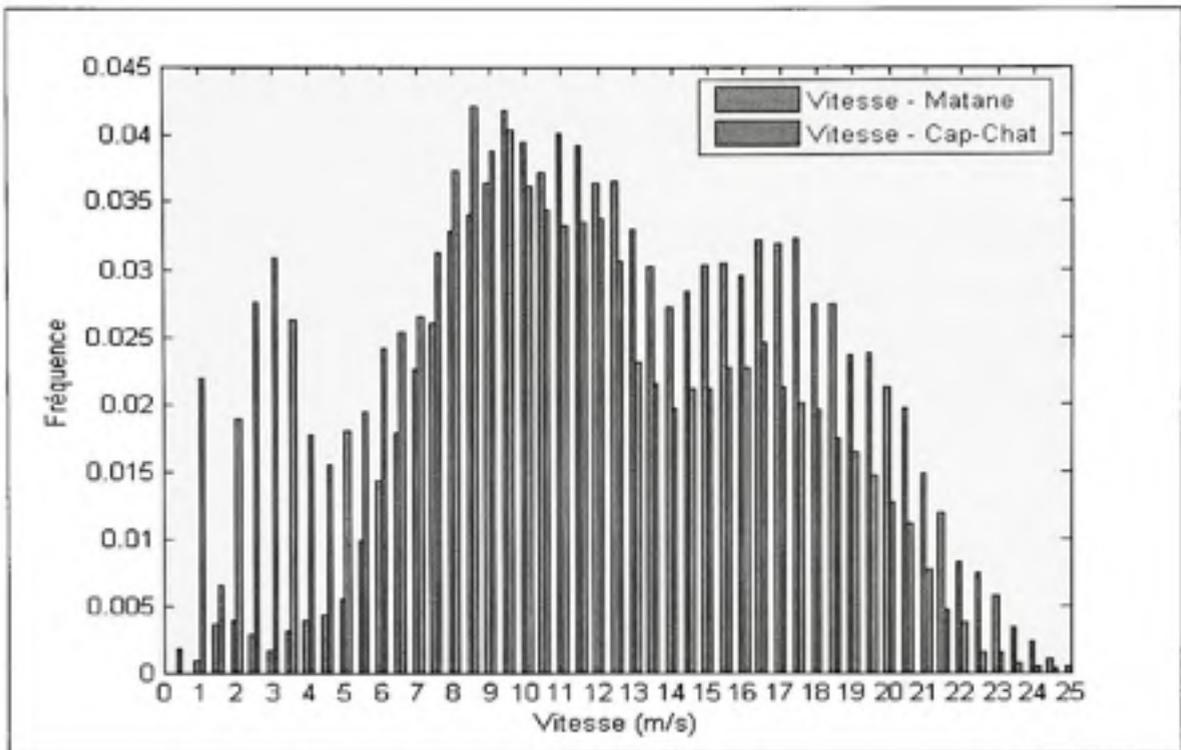


Figure 6.15 – Distribution de la vitesse.

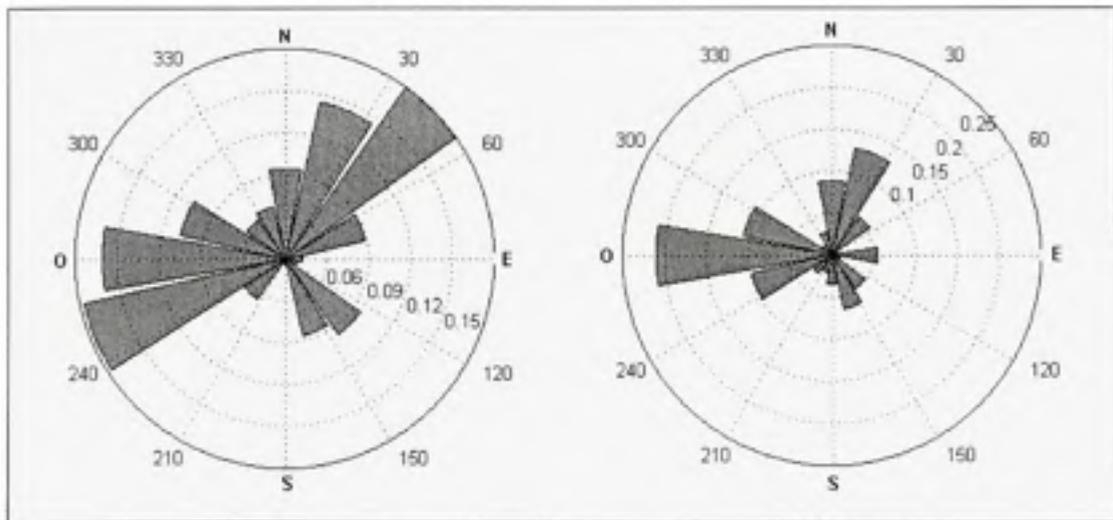


Figure 6.16 – Distribution selon la direction, Matane (gauche) et Cap-Chat (droite).

CHAPITRE 7

ÉVALUATION DES PERTES DE PERFORMANCE

Nous avons, jusqu'à présent, mis l'accent sur l'identification des événements de givre. Cette tâche a été d'autant plus compliquée que nous n'avions pas accès à des observations visuelles précises pour chacun des sites. De plus, aucun givromètre n'a été utilisé. Ces événements étant désormais identifiés, nous procédons au calcul des pertes de performance causées par ces événements de givre.

7.1 Courbe de puissance

Les pertes de puissance seront exprimées par rapport à la courbe de puissance de l'éolienne de référence. Nous avons uniquement retranché les données erronées (voir *section 3.2.2.3*) ainsi que les données associées aux événements de givre mentionnés ci-haut. On remarque également, une anomalie supplémentaire au niveau de la puissance mesurée. La *Figure 7.1* montre un exemple des couples *vitesse-puissance* provenant du site de Matane.

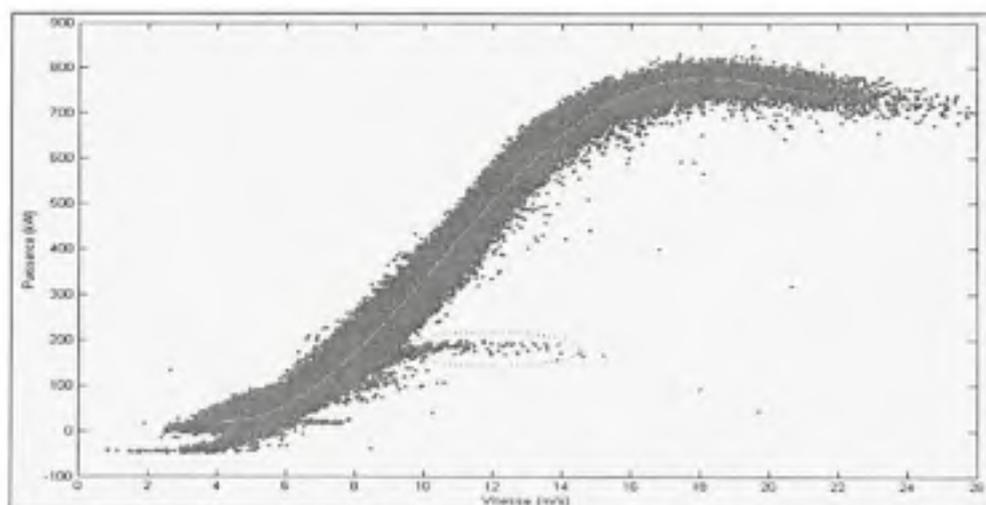


Figure 7.1 – Couple vitesse-puissance, Matane, 2000.

L'anomalie identifiée, qui apparaît tout au long de l'année, demeure inexpiquée, mais pourrait être causée lors du changement de vitesse de la génératrice. Ce changement se produit lorsque la puissance mesurée est supérieure à une valeur oscillant entre 168 kW et 259 kW. Ces données ne seront pas retranchées et sont incluses dans le calcul des courbes de puissance. Les courbes ainsi obtenues sont présentées sur la *Figure 7.2* et sur la *Figure 7.3*.

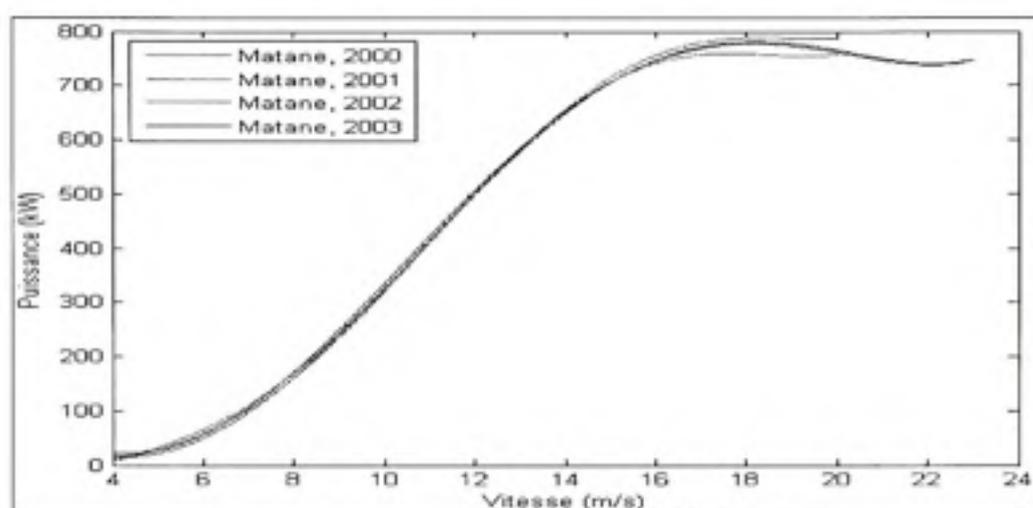


Figure 7.2 – Courbes de puissance normales, Matane.

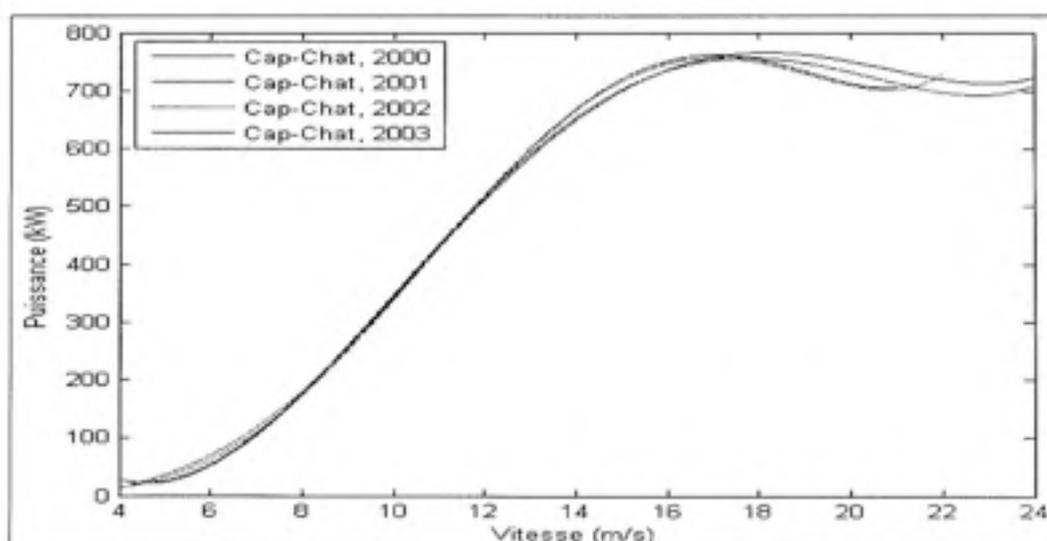


Figure 7.3 – Courbes de puissance normales, Cap-Chat.

Les courbes de puissance annuelles sont relativement similaires. On observe de légères différences à haute vitesse en raison du faible nombre de données dans ces bins. On remarque également que les courbes sont similaires pour les deux sites. Encore une fois, les différences sont plus marquées à haute vitesse.

Contrairement à une exigence de la *norme*, la vitesse du vent a été mesurée sur la nacelle de l'éolienne. Nous avons déjà justifié l'utilisation de cette méthodologie. Cette façon de procéder peut introduire des erreurs dues à un écoulement perturbé par les obstacles environnants. Nous avons donc comparé les courbes de puissances obtenues pour chacun des 16 secteurs de 22.5°. Un exemple de ces courbes est montré à la *Figure 7.4*.

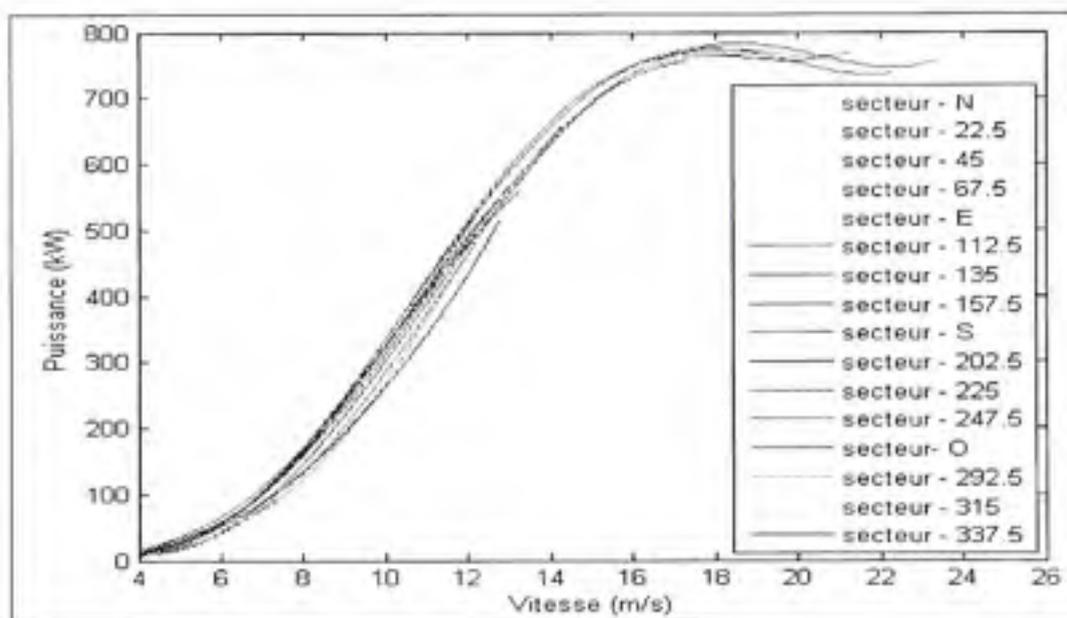


Figure 7.4 – Courbes de puissances normales et direction, Matane, 2003.

Cette figure démontre qu'il existe des différences, parfois importantes, entre les courbes de puissance établies pour les 16 secteurs. Nous n'utiliserons toutefois que les courbes établies indépendamment des secteurs et cela malgré l'observation de l'influence de la direction. Nos résultats seront néanmoins corrigés pour tenir compte de ce phénomène et il en sera question dans la section *Validité du calcul de performance*.

7.2 Pertes de performance

Nous comparons maintenant la puissance mesurée à la puissance prédite avec les courbes de puissance normale calculées à la section précédente. Dans un premier temps, nous présentons les pertes de performance absolues en perte de puissance et en perte d'énergie. Dans un deuxième temps, nous présentons les pertes de performances corrigées. En effet, il est démontré à la *section 7.3* que des pertes de performance peuvent apparaître alors même que l'éolienne est en opération normale. On peut considérer que les pertes de performance corrigées sont entièrement le résultat des événements de givre.

Le *Tableau 7.1* et le *Tableau 7.2* présentent les pertes de performance absolues, tandis que le *Tableau 7.3* et le *Tableau 7.4* présentent les pertes de performance normalisées pour les deux sites.

Les pertes de performance indiquées représentent la différence entre la moyenne de la puissance mesurée pour la durée totale de l'événement et la puissance prédite pour la même période. Sur le site de Matane, les pertes de puissance absolue varient de 60.0 kW à 259.9 kW , et l'on remarque des gains de performance de 168.6 kW et 198.7 kW . La perte d'énergie est évaluée à 33245.8 kWh . Sur le site de Cap-Chat, les pertes de puissance absolue varient de 54.0 kW à 602.0 kW , et l'on remarque des gains de performance variant entre 108.2 kW et 387.3 kW . La perte d'énergie est évaluée à 38269.6 kWh .

Ces valeurs sont légèrement moins importantes après la correction des pertes de performance, mais l'on observe toujours des pertes d'énergie de 26202.0 kWh sur le site de Matane et de 33578.2 kWh sur le site de Cap-Chat.

Mentionnons que les pertes d'énergie ont été obtenues en se basant sur une durée qui peut être inférieure à la durée de l'événement notée à la *section 6.2*. En effet, la durée notée à la *section 6.2* inclut des périodes où l'éolienne est non disponible sans que ce soit causé par les accrétions de glace.

Tableau 7.1

Pertes de performance absolues, site de Matane

No.	Date	Puissance moyenne perdue (kW)				Énergie perdue (kWh)
		P_{aero}	$P_{arrêt}$	P_{totale}	$P_{relative}$	
MA-1	09-Mar-2000 16:40	-77.1	0.0	-77.1	-33.4%	-539.8
MA-2	08-Avr-2000 14:00	-60.0	0.0	-60.0	-29.7%	-139.9
MA-3	23-Avr-2000 21:20	-131.6	0.0	-131.6	-32.0%	-2019.6
MA-4	28-Oct-2000 13:20	-163.3	0.0	-163.3	-22.9%	-2942.2
MA-5	17-Dec-2000 06:10	-122.0	0.0	-122.0	-22.3%	-916.9
MA-6	27-Dec-2000 04:50	-198.5	0.0	-198.5	-45.4%	-1856.2
MA-7	12-Avr-2001 22:10	-287.5	0.0	-287.5	-53.7%	-2323.6
MA-8	09-Nov-2001 14:40	-199.2	0.0	-199.2	-35.4%	-2985.2
MA-9	25-Dec-2001 07:30	-107.6	0.0	-107.6	-34.9%	-6008.9
MA-10	21-Fev-2002 22:10	-64.6	0.0	-64.6	-24.9%	-861.1
MA-11	27-Fev-2002 13:20	-259.9	0.0	-259.9	-38.2%	-1537.9
MA-12	03-Mar-2002 06:30	-224.9	0.0	-224.9	-32.2%	-1109.4
MA-13	10-Mar-2002 02:40	-219.8	0.0	-219.8	-44.1%	-439.7
MA-14	01-Avr-2002 18:00	-128.4	0.0	-128.4	-24.0%	-1035.4
MA-15	05-Nov-2003 07:20	-184.6	0.0	-184.6	-28.5%	-1356.8
MA-16	13-Nov-2003 12:00	-154.4	0.0	-154.4	-44.1%	-1165.9
MA-17	14-Nov-2003 05:10	-101.2	0.0	-101.2	-29.0%	-667.9
MA-18	01-Dec-2003 17:50	168.6	0.0	168.6	61.6%	452.5
MA-19	12-Dec-2003 09:00	-126.3	0.0	-126.3	-17.0%	-2191.7
MA-20	15-Dec-2003 15:20	198.7	0.0	198.7	51.9%	1725.2
MA-21	17-Dec-2003 19:50	-87.7	0.0	-87.7	-16.8%	-352.4
MA-22	24-Dec-2003 23:00	-102.2	0.0	-102.2	-74.2%	-2178.4
MA-23	31-Dec-2003 00:00	-399.2	0.0	-399.2	-66.3%	-2794.6
						-33245.8

Tableau 7.2

Pertes de performance absolues, site de Cap-Chat

		Puissance moyenne perdue (kW)				Énergie perdue (kWh)
No.	Date	P_{aero}	$P_{arrêt}$	P_{totale}	$P_{relative}$	
CC-1	11-May-2000 21:10	-73.6	0.0	-73.6	-39.7%	-220.9
CC -2	17-Nov-2000 22:50	-54.0	0.0	-54.0	-8.0%	-585.8
CC -3	12-Dec-2000 16:50	108.2	0.0	108.2	19.2%	200.1
CC -4	27-Dec-2000 02:20	-90.9	0.0	-90.9	-26.1%	-653.2
CC -5	09-Nov-2001 21:20	-185.5	0.0	-185.5	-27.3%	-2537.8
CC -6	28-Feb-2002 03:00	-602.8	0.0	-602.8	-92.6%	-12448.8
CC -7	03-Mar-2002 07:20	-139.0	0.0	-139.0	-19.5%	-233.9
CC -8	27-Apr-2002 05:30	-159.5	0.0	-159.5	-26.6%	-906.7
CC -9	03-May-2002 14:40	-244.6	0.0	-244.6	-70.6%	-448.5
CC -10	18-Nov-2002 05:40	-4.2	-386.1	-390.3	-0.1%	-9565.4
CC -11	23-Nov-2002 16:00	-95.1	0.0	-95.1	-17.4%	-2986.3
CC -12	03-Mar-2003 13:30	-104.8	0.0	-104.8	-19.1%	-3702.6
CC -13	31-Mar-2003 08:00	-103.5	0.0	-103.5	-24.5%	-1260.5
CC -14	05-Nov-2003 11:50	-96.5	0.0	-96.5	-16.2%	-130.2
CC -15	14-Nov-2003 19:30	-88.1	0.0	-88.1	-16.6%	-456.7
CC -16	01-Dec-2003 17:40	276.6	0.0	276.6	76.0%	650.1
CC -17	12-Dec-2003 10:50	-114.5	0.0	-114.5	-15.9%	-454.1
CC -18	15-Dec-2003 15:40	387.3	0.0	387.3	226.2%	2588.4
CC -19	26-Dec-2003 18:30	-259.9	0.0	-259.9	-80.2%	-5116.6
						-38269.6

Tableau 7.3

Pertes de performance corrigées, site de Matane

		Puissance moyenne perdue (kW)				Énergie perdue (kWh)
No.	Date	P _{aéro}	P _{arrêt}	P _{totale}	P _{relative}	
MA-1	09-Mar-2000 16:40	-43.7	0.0	-43.7	-19.0%	-306.2
MA-2	08-Avr-2000 14:00	-21.8	0.0	-21.8	-10.8%	-50.9
MA-3	23-Avr-2000 21:20	-101.6	0.0	-101.6	-24.7%	-1559.9
MA-4	28-Oct-2000 13:20	-132.9	0.0	-132.9	-18.6%	-2394.6
MA-5	17-Dec-2000 06:10	-88.6	0.0	-88.6	-16.2%	-666.0
MA-6	27-Dec-2000 04:50	-165.2	0.0	-165.2	-37.8%	-1544.8
MA-7	12-Avr-2001 22:10	-255.2	0.0	-255.2	-47.7%	-2063.2
MA-8	09-Nov-2001 14:40	-168.2	0.0	-168.2	-29.9%	-2519.8
MA-9	25-Dec-2001 07:30	-79.9	0.0	-79.9	-25.9%	-4461.4
MA-10	21-Fev-2002 22:10	-33.0	0.0	-33.0	-12.7%	-440.1
MA-11	27-Fev-2002 13:20	-225.3	0.0	-225.3	-33.1%	-1332.8
MA-12	03-Mar-2002 06:30	-189.3	0.0	-189.3	-27.1%	-933.7
MA-13	10-Mar-2002 02:40	-181.7	0.0	-181.7	-36.5%	-363.3
MA-14	01-Avr-2002 18:00	-96.1	0.0	-96.1	-18.0%	-775.6
MA-15	05-Nov-2003 07:20	-151.2	0.0	-151.2	-23.4%	-1111.4
MA-16	13-Nov-2003 12:00	-121.0	0.0	-121.0	-34.6%	-913.8
MA-17	14-Nov-2003 05:10	-66.6	0.0	-66.6	-19.1%	-439.9
MA-18	01-Dec-2003 17:50	120.4	0.0	120.4	43.9%	323.1
MA-19	12-Dec-2003 09:00	-96.4	0.0	-96.4	-13.0%	-1673.2
MA-20	15-Dec-2003 15:20	154.4	0.0	154.4	40.3%	1340.8
MA-21	17-Dec-2003 19:50	-52.1	0.0	-52.1	-10.0%	-209.2
MA-22	24-Dec-2003 23:00	-72.5	0.0	-72.5	-52.6%	-1545.3
MA-23	31-Dec-2003 00:00	-365.8	0.0	-365.8	-60.8%	-2560.9
						-26202.1

Tableau 7.4

Pertes de performance corrigées, site de Cap-Chat

No.	Date	Puissance moyenne perdue (kW)				Énergie perdue (kWh)
		P _{aéro}	P _{arrêt}	P _{totale}	P _{relative}	
CC-1	11-Mai-2000 21:10	-42.6	0.0	-42.6	-23.0%	-127.9
CC -2	17-Nov-2000 22:50	-29.1	0.0	-29.1	-4.3%	-316.0
CC -3	12-Dec-2000 16:50	73.0	0.0	73.0	13.0%	135.0
CC -4	27-Dec-2000 02:20	-63.6	0.0	-63.6	-18.2%	-456.9
CC -5	09-Nov-2001 21:20	-162.1	0.0	-162.1	-23.9%	-2218.0
CC -6	28-Feb-2002 03:00	-578.9	0.0	-578.9	-88.9%	-11954.4
CC -7	03-Mar-2002 07:20	-100.6	0.0	-100.6	-14.1%	-169.3
CC -8	27-Apr-2002 05:30	-130.3	0.0	-130.3	-21.7%	-740.8
CC -9	03-Mai-2002 14:40	-206.2	0.0	-206.2	-59.5%	-378.1
CC -10	18-Nov-2002 05:40	0.0	-355.1	-355.1	NA	-8782.8
CC -11	23-Nov-2002 16:00	-72.4	0.0	-72.4	-13.2%	-2272.5
CC -12	03-Mar-2003 13:30	-82.1	0.0	-82.1	-15.0%	-2899.4
CC -13	31-Mar-2003 08:00	-79.4	0.0	-79.4	-18.8%	-967.4
CC -14	05-Nov-2003 11:50	-58.1	0.0	-58.1	-9.8%	-78.4
CC -15	14-Nov-2003 19:30	-58.9	0.0	-58.9	-11.1%	-305.5
CC -16	01-Dec-2003 17:40	244.0	0.0	244.0	67.1%	573.4
CC -17	12-Dec-2003 10:50	-83.5	0.0	-83.5	-11.6%	-331.0
CC -18	15-Dec-2003 15:40	359.3	0.0	359.3	209.8%	2401.0
CC -19	26-Dec-2003 18:30	-238.2	0.0	-238.2	-73.5%	-4689.4
						-33578.4

7.3 Validité du calcul de perte de performance

Le lecteur est en droit de se demander si les pertes et gains de performance calculés sont valides et propres aux événements de givre. Est-il possible que la puissance moyenne d'un ensemble de données, prises lorsque l'éolienne est en opération normale, se situe en dessous de la courbe de puissance normale ? En d'autres mots, les pertes et gains de performance mesurés durant les événements de givres pourraient-ils être causés par le hasard ou par l'opération normale de l'éolienne ?

En effet, la *Figure 7.1* montre des couples de *vitesse-puissance* qui se trouvent aux extrémités de la *zone normale*. Pris individuellement, ces couples peuvent suggérer des pertes de performance pouvant atteindre plusieurs centaines de kilowatts en opération normale.

Le *Tableau 7.5* montre, pour différentes périodes de temps, la variation de la puissance mesurée par rapport à la puissance prédite. Nous avons, par exemple, calculé la moyenne de la puissance pour chacune des 35064 périodes de une heure pour les années 2000-2003. L'opération a été répétée pour des périodes durant de 1 à 24 heures. Ces résultats sont obtenus en analysant les données lorsque l'éolienne est en opération normale. Ce tableau démontre que la moyenne de la variation de puissance se rapproche de zéro, peu importe la période de temps analysée. On remarque également que l'écart-type ainsi que la valeur absolue de la moyenne de puissance minimale et maximale diminuent lorsque que la période analysée augmente. Ainsi, il est possible que des écarts de puissance variant de -548.6 kW à $+160.1 \text{ kW}$ apparaissent lorsque l'éolienne est en opération normale.

Tableau 7.5

Variation de la puissance par rapport à la courbe normale

		Matane		
		Variation de la puissance par rapport à la courbe normale		
Période (h)	moyenne (kW)	Écart-type	Minimum (kW)	Maximum (kW)
1	-0.04	18.20	-138.3	160.1
3	-0.03	16.69	-124.1	90.6
6	0.10	15.56	-84.1	84.9
12	0.35	14.27	-59.9	58.4
24	0.50	12.62	-56.4	43.9
		Cap-Chat		
		Variation de la puissance par rapport à la courbe normale		
Période (h)	moyenne (kW)	Écart-type	Minimum (kW)	Maximum (kW)
1	-0.39	14.62	-548.6	82.9
3	-0.39	11.87	-136.0	66.6
6	-0.45	10.62	-70.2	64.3
12	-0.47	9.23	-63.2	51.8
24	-0.23	8.05	-35.0	48.5

Ces écarts minimums et maximums sont problématiques puisqu'ils montrent que les écarts de puissance considérables ne sont pas uniquement mesurés durant les événements de givre. Le *Tableau 7.6* montre la probabilité que des écarts de puissance considérables soient mesurés alors que l'éolienne est en opération normale. Les valeurs calculées représentent donc le seuil des écarts minimaux ou maximaux comprenant 90%, 99% ou 99.9% des valeurs moyennées. Les écarts de puissance considérables existent, mais ils sont extrêmement rares.

Tableau 7.6
Probabilités des écarts considérables

Matane						
	90%		99%		99.9%	
Période (h)	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	-23.0	23.5	-40.0	51.6	-70.7	82.0
3	-21.7	22.0	-36.4	47.6	-65.3	71.9
6	-20.6	20.7	-34.5	45.8	-59.0	66.0
12	-18.7	18.8	-31.1	41.9	-50.9	53.7
24	-16.2	17.2	-27.7	31.9	-56.4	43.9
Cap-Chat						
	90%		99%		99.9%	
Période (h)	Min	Max	Min	Max	Min	Max
1	-15.7	15.5	-38.4	35.2	-75.9	50.8
3	-13.7	13.9	-31.0	31.6	-62.1	49.1
6	-12.0	12.9	-28.1	28.0	-63.2	48.5
12	-10.2	11.8	-24.1	24.5	-42.5	46.7
24	-9.0	10.6	-22.7	21.3	-35.0	48.5

Les pertes de performances présentées dans le *Tableau 7.3* et le *Tableau 7.4* ont été corrigées en fonction des précédents résultats. Nous avons retranché à la puissance moyenne prédite, la valeur de la perte de performance qui pourrait être due à l'opération normale de la turbine. Ainsi, nous obtenons des pertes de performance corrigées qui sont, dans 99% des cas, uniquement le résultat des accrétions de glace sur les instruments ou les pales.

CHAPITRE 8

DISCUSSION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

Nous avons amassé jusqu'ici une grande quantité d'information et de résultats. Nous présentons dans cette section les principaux résultats ainsi qu'une analyse de ces résultats.

8.1 Pertes de performance

Nous faisons, au début de ce mémoire, l'hypothèse que les précipitations verglaçantes et les brouillards givrants pouvaient induire une perte de performance sur l'éolienne pouvant entraîner, dans certains cas, l'arrêt de la turbine. Les résultats obtenus confirment cette hypothèse. Les événements givrants ont, dans la plupart des cas, causé des pertes aérodynamiques sur les deux éoliennes de références. Durant l'un de ces événements, la turbine a dû être stoppée.

Nous pouvons affirmer que les sites de Matane et de Cap-Chat ont été soumis respectivement à près de 13 jours et 9 jours de givrage. Selon la carte européenne du givre [48], il serait possible d'affirmer que les deux sites sont soumis à un givrage moyen (*moderate icing*).

Les résultats montrent également des événements où la performance est supérieure à la normale. Ces résultats peuvent s'expliquer par le givrage des instruments de mesure. La puissance semblera supérieure à la puissance prédite, si l'anémomètre mesure une vitesse inférieure à la vitesse réelle. Une surproduction s'expliquerait également par la turbulence de l'écoulement, par des températures extrêmement basses ou par des accrétions de glace à des vitesses élevées. Toutefois, ces conditions n'existent pas dans le cas des quatre événements de surproduction. De plus les épisodes de surproduction se produisent sensiblement au même instant pour les deux sites, ce qui permet de supposer qu'ils sont causés par un phénomène régional.

Il semblerait donc, que les anémomètres chauffés ont parfois fourni une mauvaise indication de la vitesse réelle. Il devient alors difficile de supposer que les anémomètres fonctionnaient correctement lors des autres événements de givre. En supposant que les anémomètres sous-estiment la vitesse durant les événements de givre, nous aurions alors à notre tour sous-estimé les pertes de performance.

En raison de la distance qui sépare les deux sites à l'étude et de la disponibilité des données de chacun, nous observons de nombreuses différences quant à l'existence des événements givrants. Il est intéressant de noter que les événements de surproduction se produisent au même instant sur les deux sites éliminant ainsi la possibilité que le système de chauffage ait été défectueux. Quelles sont les conditions météorologiques qui ont provoqué le givrage des instruments de mesure sans affecter négativement la performance de l'éolienne? Il est difficile de répondre à cette question, les conditions météorologiques ne sont pas complètement différentes de celles existant durant les événements de sous-production. Nous remarquons seulement que la température moyenne de ces événements est relativement basse et que leur durée est parmi les plus courtes.

8.1.1 Coûts des pertes

Puisqu'il est impossible de valider le comportement de l'anémomètre, nous supposons que la vitesse lue se rapproche de la réalité. Ainsi, nous obtenons des pertes d'énergie corrigées de -26204 kWh pour l'éolienne de référence de Matane et de -34987 kWh pour celle de Cap-Chat.

Ces valeurs représentent respectivement 0.006% et 0.008% de la production d'énergie pour les années 2000-2003. La production d'énergie a été calculée à partir des données corrigées. Ces pertes peuvent sembler négligeables, mais en supposant des redevances de 6.5 ¢/kWh [49], ces pertes représentent néanmoins un manque à gagner de $259\,074\text{\$}$ pour l'ensemble du parc.

8.1.2 Comparaison des résultats

Le logiciel RETScreen® développé par Ressources Naturelles Canada suggère que les pertes dues à l'encrassement ou à l'accrétion de glace sur les pales varieront entre 1% et 10% de la production d'énergie annuelle. [50] Selon les résultats provenant du parc *Le Nordais*, ces estimations sont beaucoup trop importantes. Les accrétions de glace sur les pales et le changement de vitesse de la génératrice expliquent pratiquement toutes les pertes de performances. Il ne peut donc y avoir entre 1% et 10% de perte causée par l'encrassement des pales.

Il est maintenant possible de comparer nos résultats avec les données opérationnelles provenant de quelques parcs éoliens installés en climat nordique. Les pertes d'énergie estimées pour le parc éolien de Searsburg, Vermont, varient entre 9% et 14% durant les mois hivernaux. Ces pertes incluent le givrage des éoliennes ainsi que d'autres causes non identifiées. Il est difficile de comparer ces résultats avec les nôtres puisque les événements de givre n'ont pas été identifiés précisément.

Les pertes d'énergie sur le site d'Acqua Spruzza en Italie ont été estimées à 19% de la production totale durant les mois hivernaux. Cette valeur a été calculée en faisant l'hypothèse que les événements givrants causeront toujours l'arrêt de la turbine. Bien que cette hypothèse soit fautive pour le parc *Le Nordais*, nous avons néanmoins calculé la perte d'énergie du site en supposant que la turbine est arrêtée durant les périodes de givre. La perte d'énergie pour les mois hivernaux est alors d'environ 1%. Cette différence peut s'expliquer par la fréquence des événements de givrage affectant le site d'Acqua Spruzza, situé à 1350 mètres d'altitude.

Les pertes d'énergie causées par le givrage dans le parc éolien de Pori en Finlande oscillent entre 7% et 19% selon l'événement et l'utilisation ou non d'un système de dégivrage. Ces valeurs sont plus faibles que les pertes calculées pour notre parc. Les éoliennes du site de Pori utilisent un système de contrôle actif de la puissance.

Nous observons finalement que les observations provenant du programme d'évaluation des éoliennes en Allemagne ne s'apparentent pas à nos conclusions. En Allemagne, les turbines sont arrêtées dans 89% des cas pour cause de givrage.

Les expériences menées en soufflerie par Jasinsky [40] démontrent que les pertes de performances peuvent dépasser 20%. Ces observations sont en accord avec nos propres résultats, mais nous observons également des pertes qui peuvent être beaucoup plus importantes. Nous ne pouvons effectuer de comparaison directe puisque nous ne connaissons pas tous les paramètres de nos accrétions. Il était également rapporté dans cette étude qu'un givrage important d'un profil pouvait mener à des épisodes de surproduction. Nous n'avons pu confirmer ces résultats.

8.1.3 Discussion sur les éoliennes à vitesse et pas variables

La puissance des éoliennes du parc *Le Nordais* est contrôlée par décrochage aérodynamique. Nous pouvons affirmer que cette technologie est de moins en moins utilisée en Amérique du Nord et en Europe, du moins pour les éoliennes de grande puissance. Cette technologie est relativement simple à mettre en œuvre, du point de vue mécanique, et permet de limiter la puissance à des vitesses de vent élevées. Toutefois, lors du givrage des pales, il devient impossible de modifier le pas des pales pour s'adapter aux modifications de la performance aérodynamique. Le décrochage aérodynamique se produit alors à des vitesses plus faibles, et la performance de l'éolienne est grandement affectée.

La plupart des éoliennes modernes modifient le pas ou la vitesse de rotation de l'éolienne en fonction d'un ensemble de paramètres, dont la puissance produite. La possibilité de modifier le pas des éoliennes laisse présager des pertes de puissance plus faible durant les mêmes périodes de givrage. En effet, les conditions d'opération de la turbine seront optimisées, et cela, malgré les accrétions de glace. Nous pouvons cependant prévoir des complications sur les éoliennes utilisant la vitesse du vent pour le contrôle de l'éolienne. En cas d'accrétion de glace sur les anémomètres, l'automate programmable prendra des décisions à partir de données erronées.

8.2 Techniques de détection du givre

Plusieurs techniques ont été utilisées pour identifier les périodes de givre. Nous tentons maintenant d'établir la précision et la validité des outils développés pour la détection de ces périodes.

8.2.1 Données historiques et inspections visuelles (DHVIS)

Cet outil a été utilisé dans 39% des cas pour la détection d'événements de givre sur le site de Matane et dans 16% des cas sur le site de Cap-Chat.

Il va sans dire que cet outil aurait été d'une plus grande utilité si nous avions bénéficié d'observations visuelles prises à proximité des sites. En raison des distances séparant les différents sites, nous observons dans certains cas une correspondance entre les observations visuelles et les périodes de givre, alors que dans d'autres cas, il y a plutôt un décalage temporel. Finalement, certains événements de givre notés à Mont-Joli semblent n'avoir aucun impact sur les éoliennes de références. On remarque d'ailleurs, que plus la distance augmente entre le lieu des observations et la turbine de référence, plus il devient difficile de tirer des conclusions à partir de cet outil.

Dans sa forme actuelle, l'outil permet de confirmer que des pertes de performance sont causées par des accrétions de glace, mais ne permet pas d'identifier avec précision les pluies verglaçantes ou les brouillards givrants.

8.2.2 Température et humidité relative (DRHT)

Cet outil a été utilisé dans 56% des cas pour la détection d'événements de givre sur le site de Matane et dans 63% des cas sur le site de Cap-Chat.

Nous observons également la fréquence d'apparition de cet outil durant les événements givrants. Le *Tableau 8.1* montre la fréquence d'identification positive (*Id+*)

et négative (*Id-*) pour les deux sites. Par exemple, en 2000, sur le site de Matane, 7% des événements *DRHT* se produisent durant les périodes de givrage. À l'inverse, 93% des événements *DRHT* apparaissent en dehors des périodes de givrage.

Tableau 8.1

Fréquence d'identification - *DRHT*

Année	Matane		Cap-Chat	
	Id+	Id-	Id+	Id-
2000	0.07	0.93	0.06	0.94
2001	0.05	0.95	0.07	0.93
2002	0.14	0.86	0.12	0.88
2003	0.14	0.86	0.08	0.92

Il semble logique de supposer que l'impact des événements *DRHT* sur la turbine ne soit pas immédiat, mais qu'il se produise lorsque les accrétions de glace deviennent relativement importantes. Nous refaisons l'analyse précédente en supposant que les événements de givre débutent six heures avant l'heure où l'impact apparaît. Nous présentons ces nouveaux résultats dans le *Tableau 8.2*. On augmente de cette façon, légèrement la capacité d'identification des événements de givre, capacité qui varie alors entre 5% et 17% selon l'année et le site.

Tableau 8.2

Fréquence d'identification (6h) - *DRHT*

Année	Matane		Cap-Chat	
	Id+	Id-	Id+	Id-
2000	0.10	0.90	0.12	0.88
2001	0.05	0.95	0.07	0.93
2002	0.16	0.84	0.13	0.87
2003	0.17	0.83	0.11	0.89

Nous pouvons affirmer que la mesure de l'humidité relative et de la température permet de confirmer que des pertes de performance sont attribuables au givrage. En effet, la température durant les événements se situe généralement sous la barre de 1°C alors que l'humidité relative est presque toujours supérieure à 80%. La *Figure 6.13* et la *Figure 6.14* montrent la distribution de la température et de l'humidité relative durant les périodes de givre. Par contre, nous ne pouvons affirmer que de telles conditions vont entraîner une perte de performance de l'éolienne. Dans plus de 80% des cas, les événements *DRHT* identifiés ($T < 0^{\circ}\text{C}$ et $RH > 95\%$) n'ont aucun impact sur l'éolienne.

8.2.3 Comparaison entre un anémomètre chauffé et non chauffé (*DACNC*)

Cet outil a été utilisé dans 48% des cas pour la détection d'événements de givre sur le site de Matane et dans 21% des cas sur le site de Cap-Chat.

Nous observons également la fréquence d'apparition de cet outil durant les événements givrants. Le *Tableau 8.3* montre la fréquence d'identification positive (*Id+*) et négative (*Id-*) pour les deux sites.

Nous remarquons dans ce tableau, que les périodes où la vitesse de l'anémomètre chauffé est plus élevée que la vitesse de l'anémomètre non chauffé se produisent plus fréquemment durant les périodes de givre que l'inverse. Néanmoins, il semble difficile de se servir de cet outil pour l'identification des périodes de givre. L'outil permet tout de même de confirmer certains des événements de givre. Nous pouvons supposer qu'un outil similaire constitué par deux anémomètres installés à proximité l'un de l'autre pourrait permettre de détecter des pluies verglaçantes ou des brouillards givrants.

Tableau 8.3
Fréquence d'identification - DACNC

	$V_{\text{chauffé}} > V_{\text{non chauffé}}$			
	Matane		Cap-Chat	
Année	Id+	Id-	Id+	Id-
2000	0.25	0.75	0.00	1.00
2001	0.12	0.88	0.00	1.00
2002	0.14	0.86	0.08	0.92
2003	0.15	0.85	0.24	0.76
	$V_{\text{chauffé}} < V_{\text{non chauffé}}$			
	Matane		Cap-Chat	
Année	Id+	Id-	Id+	Id-
2000	0.00	1.00	0.02	0.98
2001	0.01	0.99	0.00	1.00
2002	0.01	0.99	0.01	0.99
2003	0.01	0.99	0.00	1.00

8.2.4 Comportement erroné d'un anémomètre ou d'une girouette (DAE)

Cet outil a été utilisé dans 13% des cas pour la détection d'événements de givre sur le site de Matane et dans 5% des cas sur le site de Cap-Chat.

Nous observons également la fréquence d'apparition de cet outil durant les événements givrants. Le *Tableau 8.4* montre la fréquence d'identification positive (*Id+*) et négative (*Id-*) pour les deux sites.

Tableau 8.4

Fréquence d'identification - DAE

	Girouette			
	Matane		Cap-Chat	
Année	Id+	Id-	Id+	Id-
2000	0.00	1.00	0.00	1.00
2001	0.01	0.99	0.00	1.00
2002	0.27	0.73	0.01	0.99
2003	0.21	0.79	0.00	1.00
	Anémomètre			
	Matane		Cap-Chat	
Année	Id+	Id-	Id+	Id-
2000	0.00	1.00	0.00	1.00
2001	0.00	1.00	0.00	1.00
2002	0.00	1.00	0.62	0.38
2003	0.00	1.00	0.00	1.00

La majorité des événements DAE apparaissent en dehors des périodes de givrage, à l'exception de l'an 2002 sur le site de Cap-Chat. Nous pouvons peut-être expliquer ce résultat par la sévérité de l'événement de givrage CC-6. Bien que nous ignorions le diamètre moyen des gouttelettes d'eau et la teneur en eau liquide de cet événement, il est permis de croire en sa sévérité étant donné la vitesse des vents mesurée et la durée de l'événement.

Ces résultats semblent indiquer que le givrage de ces instruments ne provoque pas nécessairement une panne des instruments non chauffés. Cet outil identifie les données pour lesquelles les mesures de vitesse et de direction ne varient pas dans le temps, ce qui aurait été un signe de givrage. Nous pensons que le givrage, s'il y a

givrage des instruments, modifie le comportement des instruments sans pour autant nuire à leur fonctionnement mécanique.

Cet outil nous apparaît donc peu approprié pour la détection de givre, du moins pour les anémomètres et les girouettes utilisées dans cette étude.

8.2.5 Puissance inférieure à la puissance prédite (*DPIP*)

Cet outil a été utilisé dans 100% des cas pour la détection des événements de givre. Il est sans surprise le plus utilisé des outils, puisque nous recherchions justement ces pertes de puissance.

Nous observons également la fréquence d'apparition de cet outil durant les événements givrants. Le *Tableau 8.5* montre la fréquence d'identification positive (*Id+*) et négative (*Id-*) pour les deux sites.

Tableau 8.5

Fréquence d'identification (1) - *DPIP*

Année	Toutes les températures			
	Matane		Cap-Chat	
	Id+	Id-	Id+	Id-
2000	0.75	0.25	0.25	0.75
2001	0.76	0.24	0.30	0.70
2002	0.61	0.39	0.59	0.41
2003	0.82	0.18	0.75	0.25

La capacité d'identification des événements de givre varie entre 25% et 82% selon l'année et le site. Cet outil peut être amélioré en éliminant les données *DPIP* causées par les changements de vitesse de la turbine. Pour y parvenir, nous éliminons toutes les données *DPIP* où la température est supérieure à 0°C. La capacité d'identification

des événements de givre varie maintenant entre 48% et 93% est présentée dans le *Tableau 8.6*.

Tableau 8.6

Fréquence d'identification (2) - DPIP

Année	Températures			
	Matane		Cap-Chat	
	Id+	Id-	Id+	Id-
2000	0.87	0.13	0.48	0.52
2001	0.93	0.07	0.65	0.35
2002	0.75	0.25	0.83	0.17
2003	0.92	0.08	0.90	0.10

Malgré le raffinement, ces résultats incluent toujours des données DPIP causées par le changement de vitesse de la turbine. Pour remédier à ce problème, nous éliminons toutes les données *DPIP* qui ne respectent pas un critère temporel. Ce critère est représenté par 15 données consécutives qui sont chacune séparée d'au maximum trois minutes. La capacité d'identification des événements de givre varie maintenant entre 82% et 98% est présentée dans le *Tableau 8.7*.

Tableau 8.7

Fréquence d'identification (3) - DPIP

Année	Durée			
	Matane		Cap-Chat	
	Id+	Id-	Id+	Id-
2000	0.95	0.05	0.82	0.18
2001	0.96	0.04	0.91	0.09
2002	0.94	0.06	0.93	0.07
2003	0.98	0.02	0.98	0.02

Ce critère permet de développer un outil relativement fiable d'identification des événements de givre. L'éolienne doit néanmoins demeurer en opération pour que l'outil soit utilisable.

8.2.6 Code d'erreur de l'éolienne (DCE)

Cet outil a été utilisé dans 9% des cas pour la détection d'événements de givre sur le site de Matane et dans 21% des cas sur le site de Cap-Chat.

Nous rappelons qu'aucun de ces codes d'erreur n'a été identifié sur les éoliennes de références, mais plutôt sur les autres éoliennes du parc. Nous sommes d'avis que l'enregistrement de certains codes d'erreur sur l'éolienne de référence permettrait de détecter du givrage. Dans notre cas, il semblerait donc, que du givrage ait affecté quelques-unes des autres éoliennes du parc. Il demeure néanmoins difficile de supposer que l'éolienne de référence soit également affectée à partir de ces résultats. L'outil ne permet, dans ce cas, que de confirmer l'existence de givrage.

CHAPITRE 9

CONCLUSION

Nous faisons l'hypothèse au début de ce mémoire que les accrétions de glace sur les instruments ou les pales d'une éolienne allaient générer une baisse de performance. Cette hypothèse est confirmée par les résultats présentés dans ce mémoire.

La première étape menant à l'évaluation des pertes de performance a été d'identifier et de caractériser les phénomènes givrants s'étant produits sur les sites de Matane et Cap-Chat. Le nombre d'événements identifiés est de 23 pour le site de Matane et de 19 pour le site de Cap-Chat. Six outils ont été utilisés pour identifier les événements. Nous avons analysé, dans un premier temps, les données visuelles et historiques lorsque disponibles. Par la suite, nous avons observé le comportement des instruments de mesure afin de relever des anomalies. Finalement, nous avons vérifié le comportement des éoliennes du parc afin de relever les puissances hors-norme et les codes d'erreur pouvant être attribués au givrage.

Le calcul des pertes de performance a permis de démontrer que le givrage de l'éolienne amène généralement une perte de performance de l'éolienne qui peut aller jusqu'à l'arrêt de la turbine. Nous avons également identifié quelques cas de surproduction, probablement causés par le givrage des anémomètres. Nous rappelons ici que la perte de puissance moyenne durant un événement de givre atteint environ 20%, alors que la perte d'énergie peut atteindre 0.008% de la production totale prévue.

Nous mentionnons à nouveau l'importance de mesures fiables de la vitesse du vent pour l'évaluation de la performance de l'éolienne. Nous ne pouvons garantir la fiabilité des instruments de mesure durant les événements givrants et il est probable que les pertes de puissance mesurées sont plus importantes en réalité. Nous recommandons fortement que les anémomètres soient choisis avec le plus grand soin dans de futures recherches sur le sujet.

Les résultats obtenus le sont pour des éoliennes dont le contrôle s'effectue par décrochage. En ce sens, nous ne pouvons soutenir que des éoliennes à pas variable subiraient des pertes de puissance du même ordre. Toutefois, peu importe la technologie utilisée, le risque de gel des instruments de mesure demeure si ceux-ci ne sont pas adaptés au climat nordique.

Malgré ces limitations, il est possible d'affirmer que tous les parcs éoliens québécois seront affectés par le givrage au cours de leur vie. Dans le but de limiter l'impact du givrage sur la productivité des parcs éoliens québécois, nous croyons fortement que l'étude des phénomènes givrants devrait être poursuivie, et notamment l'étude des aspects suivants :

- *Étude et développement d'instrument de mesure adaptés aux conditions nordiques;*
- *Évaluation du risque et de la sévérité de givrage sur le territoire québécois.*

Nous devons également attirer l'attention des promoteurs et des opérateurs de parcs éoliens sur les points suivants :

- *Les pertes de performance dues au givrage sont une réalité des parcs éoliens québécois, mais elles ne doivent pas être surestimées au moment de l'étude du projet. Des prévisions précises et exactes permettront de mieux prévoir le rendement d'un parc;*
- *Le contrôle par décrochage aérodynamique n'est pas une technologie adaptée au climat nordique et ne devrait être envisagée qu'en dernier recours;*
- *Les anémomètres antigivre doivent être sélectionnés avec le plus grand soin.*

Nous croyons qu'il sera ainsi possible de limiter l'impact du givrage sans avoir à réaliser d'investissements importants au niveau de technologie active de dégivrage.

ANNEXE I

COORDONNÉES ET NUMÉROTATION DES ÉOLIENNES

Le tableau suivant présente la numérotation des fichiers et des éoliennes et décrit la position géographique des éoliennes de Matane.

Tableau A1.1

Éoliennes de Matane

No. fichier	No. éolienne	Latitude	Longitude	Altitude
1	1	5403335.00	297044.00	171
2	2	5403428.00	296938.00	167
3	3	5403521.00	296831.00	179
4	4	5403637.00	296699.00	190
5	5	5404418.00	296418.00	134
6	6	5404548.00	296418.00	128
7	7	5404657.00	296418.00	123
8	8	5403911.00	297433.00	157
9	9	5404108.00	297204.00	168
10	10	5404246.00	297049.00	178
11	11	5404478.00	296773.00	145
12	12	5404679.00	296776.00	153
13	13	5404805.00	296725.00	147
14	14	5404934.54	296757.75	121
15	15	5405128.00	297110.00	147
16	16	5405202.45	297226.78	156
17	18	5404016.00	297309.00	158
18	19	5405566.00	298698.00	121
19	20	5405639.00	297498.00	135
20	21	5405725.00	297558.00	138
21	22	5405845.16	297586.03	122
22	23	5405982.36	297649.11	113
23	24	5403625.00	300047.00	199
24	25	5402170.00	298766.00	212

No. fichier	No. éolienne	Latitude	Longitude	Altitude
25	26	5402293.00	298789.00	211
26	27	5402409.00	298830.00	218
27	28	5402499.00	298874.00	220
28	29	5404295.00	298881.00	156
29	30	5404410.00	298952.00	154
30	31	5404537.00	299031.00	148
31	32	5404633.77	299124.58	137
32	34	5405738.00	298725.00	122
33	35	5405883.00	298803.00	120
34	37	5405763.00	298988.00	127
35	39	5403873.00	299800.00	189
36	40	5403773.00	299912.00	199
37	41	5402982.62	299531.20	208
38	42	5403139.62	299621.20	205
39	43	5403278.31	299565.10	0
40	44	5403417.00	299509.00	191
41	45	5403514.00	299386.00	195
42	46	5403396.00	299796.00	202
43	47	5403549.74	299681.78	207
44	48	5403673.00	299601.00	187
45	49	5403484.03	300222.03	207
46	50	5403673.00	300209.00	197
47	51	5403830.00	300193.00	194
48	52	5403961.00	300261.00	169
49	54	5405169.99	299797.21	148
50	55	5405269.81	299880.19	152
51	58	5405496.72	300589.98	137
52	59	5405586.90	300448.84	143
53	60	5405697.00	300264.00	149
54	65	5407336.00	300753.00	97
55	66	5407416.00	300965.00	109
56	67	5407490.00	301151.00	115
57	96	5407232.00	300477.00	83
MAT	N/A	5404525.00	296270.00	126

Le tableau suivant présente la numérotation des fichiers et des éoliennes et décrit la position géographique des éoliennes de Cap-Chat.

Tableau A1.2

Éoliennes de Cap-Chat

No. fichier	No. éolienne	Latitude	Longitude	Altitude
1	73	5436171	358659	105.12
2	71	5436372	358453	98.12
3	23	5436496	358320	95.12
4	24	5436586	358224	105.12
5	3	5436378	357810	71.12
6	14	5436509	358059	95.12
7	13	5436419	358153	91.12
8	12	5436186	358274	100.12
9	11	5436056	358282	99.12
10	10	5435917	358325	99.12
11	34	5434709	360556	309.12
12	35	5434792	360471	294.12
13	33	5434851	360312	290.12
14	32	5434717	360301	298
15	31	5434895	359822	270.12
16	30	5434837	359475	257.12
17	29	5434886	359352	246.12
18	28	5434862	359643	267.12
19	27	5434919	359232	241.12
20	97	5434768	359966	278.12
21	26	5436772	358468	104.12
22	25	5436668	358577	110.12
23	72	5436564	358689	99.12
24	41	5436859	358664	103.12
25	40	5436770	358758	111.12
26	39	5436672	358860	108.12
27	38	5436576	358963	116.12
28	37	5436477	359060	126.12

No. fichier	No. éolienne	Latitude	Longitude	Altitude
29	36	5436373	359173	133.12
30	43	5437019	358875	110.12
31	42	5436924	358977	121.12
32	79	5436827	359074	123.12
33	80	5436718	359184	113.12
34	81	5436596	359316	126.12
35	82	5436405	359514	130.12
36	45	5437164	359111	108.12
37	44	5437067	359216	126.12
38	83	5436968	359316	123.12
39	84	5436863	359424	108.12
40	85	5436759	359535	121.12
41	47	5437184	359460	113.12
42	46	5437282	359358	104.12
43	87	5437082	359570	108.12
44	52	5437293	359666	103.12
45	48	5437397	359556	101.12
46	89	5437125	360565	102.92
47	66	5437587	360851	95.92
48	93	5437725	360838	104.12
49	57	5437797	361145	91.92
50	58	5437902	361031	97.92
51	59	5438003	360922	116.92
52	60	5438103	360820	110.92
53	61	5438202	360719	108.12
54	62	5438186	361051	98.92
55	63	5438286	360942	106.92
56	54	5437320	360372	116.92
57	55	5437413	360268	113.92
58	49	5437220	360140	116.12
59	50	5437309	360038	110.12
60	51	5437397	359942	103.12
61	53	5435260	358527	183.12
62	22	5435373	358570	199.12
63	21	5435109	358438	210.12

No. fichier	No. éolienne	Latitude	Longitude	Altitude
64	20	5435008	358393	216.12
65	5	5435105	358212	198.12
66	4	5434983	358159	213.12
67	6	5435223	358265	176.12
68	7	5435385	358329	151.12
69	8	5435514	358302	146.12
70	9	5435661	358299	117.12
71	2	5436179	357758	53.12
72	70	5436078	357426	36.12
73	69	5435861	357050	29.12
74	68	5435735	356845	27.12
75	98	5435468	356690	29.12
76	67	5435558	356576	27.12
MAT	N/A	5435537	356494	23

ANNEXE II

SPÉCIFICATIONS DE L'ÉOLIENNE NEG MICON 750 kW

Le tableau suivant présente les caractéristiques de l'éolienne *NEG Micon*.

Tableau A2.1

Spécifications de l'éolienne

Général	
Fabriquant	NEG Micon A/S
Modèle	NM750/48
Type (horizontal / vertical)	Horizontal
Puissance nominale	750 kW
Contrôle de la puissance	Dan Control TAC 1
Hauteur de la nacelle (au-dessus de la fondation)	55 m
Hauteur de la nacelle (au-dessus du sol)	55 m
Poids total (sans le rotor et la tour)	19.5 tonnes
Vitesse du vent nominale	16 m/s
Limites opérationnelles minimales et maximales	3.5 m/s à 25 m/s
Vitesse de vent maximale	60 m/s
Durée de vie sécuritaire	25 ans
Contribution au courant de court-circuit	-kA
Rotor	
Diamètre	48.2 m
Aire balayée	1824 m ³
Nombre de pales	3
Type de nacelle	Sphère
Position relative à la tour	Face au vent
Vitesse nominale	22.2 / 14.8 RPM
Vitesse spécifique	55.8 m/s
Angle de calage	-3.4°
Angle du cône	0°
Angle d'inclinaison	5°

Solidité	6.30%
Distance entre le rotor et la tour	2.25 m
Poids total (avec nacelle)	12.5 tonnes
Pales	
Fabriquant	LM Glasfiber
Modèle	LM 23.5
Section de la pale (intérieure)	2.391 m
Section de la pale (extérieure)	1.330 m
Matériel	Fibre de verre polyester / Fibre de carbone epoxy
Longueur	23.5 m
Profil des pales	NACA 63-serie
twist	18.66°
Aire de la pale	38.6 m ²
Corde (maximum / minimum)	2.25 m / 0.984 m
Équipements additionnels	Accélérateurs de décrochage (4)
Réducteur	
Fabriquant	Flender
Modèle	PEAC 4300
Design	Planétaire 1 step Arbre parallèle 2 steps
Ratio de réduction	81:1
Poids (sans huile)	5.5 tonnes
Génératrice	
Fabriquant	Elin
Nombre	2 places
design	Asynchrone
Puissance nominale	750 kW
Vitesse de rotation	1800 / 1200 RPM
Voltage	600 V
Fréquence	60 Hz
Tour	
Fabriquant	NEG Micon A/S
Design	Conique, tubulaire
Matériel	Plaques d'acier soudées
Longueur	53.6 m

Diamètre minimum	1.64 m
Diamètre maximum	3 m
Nombre de sections	2
Poids total	38 tonnes
Actuateur d'orientation de la nacelle	
Design	Actif
Actuateur	Électrique
Système d'amortissement durant l'opération	Freinage par friction
Conditions climatiques	
Durée de vie calculée	25 ans
Température d'opération limite	-40°C à +40°C
Température d'opération standard	-30°C à +30°C
Vitesse du vent extrême (Moyenne – 10 minutes)	40 m/s
Vitesse du vent maximale (Moyenne – 2 secondes)	60 m/s
Vitesse d'opération maximale (Moyenne – 10 minutes)	25 m/s

ANNEXE III

ANGLE DE CALAGE DES ÉOLIENNES

Le tableau suivant présente l'historique des angles de calage de l'éolienne de référence du site de Matane.

Tableau A3.1

Angles de calage – Matane

Éoliennes	Pale 1	Pale 2	Pale 3	Moyenne	Date
6	-3.2	-3.8	-3.3	-3.4	
6	-2.9	-3	-2.9	-2.9	19/10/00
6				-4.2	01/12/00
6	-3.4	-3.5	-3.1	-3.3	10/01/01
6	-4.8	-4.3	-5.1	-4.7	11/05/01
6	-5.3	-4.9	-5.1	-5.1	22/05/01

Le tableau suivant présente l'historique des angles de calage de l'éolienne de référence du site de Cap-Chat.

Tableau A3.2

Angles de calage – Cap-Chat

Éolienne	Pale 1	Pale 2	Pale 3	Moyenne	Date
67	-3.2	-3.4	-3	-3.2	
67	-3.7	-3.6	-3.9	-3.8	27/10/00

ANNEXE IV

ENTÊTES DES FICHIERS DE DONNÉES

Voici l'entête des fichier (.mat) de données météorologiques provenant des stations de Mont-Joli et Cap-Chat.

Tableau A4.1

Entête des fichiers EC

Colonne	Description	Temps_x	Description
1	Date (format Matlab)	1	Averses de neige
2	Température (°)	2	Averses de pluie
3	Point de rosée (°)	3	Brouillard
4	Humidité relative (%)	4	Brouillard verglaçant
5	Direction du vent (10°)	5	Bruine
6	Vitesse du vent (km/h)	6	Brume sèche
7	Visibilité (km)	7	Dégagé
8	Pression atmosphérique (kPa)	8	Généralement dégagé
9	Pluie (mm)*	9	Généralement nuageux
10	Neige (cm)*	10	Granule de glace
11	Précipitation totale (mm)*	11	Neige
12	<i>Temps_1 (valeur numérique)**</i>	12	Neige forte
13	<i>Temps_2 (valeur numérique)**</i>	13	Neige modérée
14	<i>Temps_3 (valeur numérique)**</i>	14	Nuageux
15	<i>Temps_4 (valeur numérique)**</i>	15	Orage
* Précipitations journalières ** La description des conditions climatiques apparaît uniquement dans les fichiers provenant de Mont-Joli.		16	Pluie
		17	Pluie forte
		18	Pluie verglaçante
		19	Poudrerie élevée

Voici l'entête des fichier (.maf) de données météorologiques provenant des tours de mesure des sites de Matane et Cap-Chat.

Tableau A4.2

Entête des fichiers REF

	Matane	Cap-Chat
1	Année	Année
2	Mois	Mois
3	Jour	Jour
4	Heure	Heure
5	Minute	Minute
6	Vitesse moyenne	Batterie
7	Vitesse écart-type	Vitesse moyenne
8	Vitesse min.	Vitesse écart-type
9	Vitesse max.	Vitesse min.
10	Vitesse (#6) moyenne	Vitesse max.
11	Vitesse (#6) écart-type	Vitesse (#67) moyenne
12	Vitesse (#6) min.	Vitesse (#67) écart-type
13	Vitesse (#6) max.	Vitesse (#67) min.
14	Température	Vitesse (#67) max.
15	Pression atmosphérique	Direction moyenne
16	Direction moyenne	Disponibilité
17	Direction écart-type	Puissance (#67) moyenne
18	Direction min.	Puissance (#67) écart-type
19	Direction max.	Puissance (#67) min.
20	Disponibilité	Puissance (#67) max.
21	Puissance (#6) moyenne	
22	Puissance (#6) min.	
23	Puissance (#6) max.	
24	Puissance (#6) écart-type	

Voici l'entête des fichier (.mat) des données d'opération provenant des éoliennes des sites de Matane et Cap-Chat.

Tableau A4.3
Entête des fichiers EOL

1	kW Min	0.1	25	TempGearB1 Min	1
2	kW Max	0.1	26	TempGearB1 Max	1
3	kW Avr	0.1	27	TempGearB1 Avr	1
4	kW Var	1	28	TempGearB1 Var	1
5	kVAr Min	0.1	29	TempGearB2 Min	1
6	kVAr Max	0.1	30	TempGearB2 Max	1
7	kVAr Avr	0.1	31	TempGearB2 Avr	1
8	kVAr Var	1	32	TempGearB2 Var	1
9	Wind Min	0.1	33	TempAmbinet Min	1
10	Wind Max	0.1	34	TempAmbinet Max	1
11	Wind Avr	0.1	35	TempAmbinet Avr	1
12	Wind Var	1	36	TempAmbinet Var	1
13	TempGen G1 Min	1	37	TempNacelle Min	1
14	TempGen G1 Max	1	38	TempNacelle Max	1
15	TempGen G1 Avr	1	39	TempNacelle Avr	1
16	TempGen G1 Var	1	40	TempNacelle Var	1
17	TempGen G2 Min	1	41	TempPanel Min	1
18	TempGen G2 Max	1	42	TempPanel Max	1
19	TempGen G2 Avr	1	43	TempPanel Avr	1
20	TempGen G2 Var	1	44	TempPanel Var	1
21	TempGearOil Min	1	45	TempThyristor Min	1
22	TempGearOil Max	1	46	TempThyristor Max	1
23	TempGearOil Avr	1	47	TempThyristor Avr	1
24	TempGearOil Var	1	48	TempThyristor Var	1

49	NacellePos Min	1	76	VoltL2 Var	1
50	NacellePos Max	1	77	VoltL3 Min	1
51	NacellePos Avr	1	78	VoltL3 Max	1
52	NacellePos Var	1	79	VoltL3 Avr	1
53	HydrWingTips Min	1	80	VoltL3 Var	1
54	HydrWingTips Max	1	81	CurrentL1 Min	1
55	HydrWingTips Avr	1	82	CurrentL1 Max	1
56	HydrWingTips Var	1	83	CurrentL1 Avr	1
57	HydrCaliper Min	1	84	CurrentL1 Var	1
58	HydrCaliper Max	1	85	CurrentL2 Min	1
59	HydrCaliper Avr	1	86	CurrentL2 Max	1
60	HydrCaliper Var	1	87	CurrentL2 Avr	1
61	RPMGenerator Min	1	88	CurrentL2 Var	1
62	RPMGenerator Max	1	89	CurrentL3 Min	1
63	RPMGenerator Avr	1	90	CurrentL3 Max	1
64	RPMGenerator Var	1	91	CurrentL3 Avr	1
65	RPMRotor Min	1	92	CurrentL3 Var	1
66	RPMRotor Max	1	93	Frequency Min	0.1
67	RPMRotor Avr	1	94	Frequency Max	0.1
68	RPMRotor Var	1	95	Frequency Avr	0.1
69	VoltL1 Min	1	96	Frequency Var	1
70	VoltL1 Max	1	97	ErrorCode	1
71	VoltL1 Avr	1	98	GeneratorOnline	1
72	VoltL1 Var	1			
73	VoltL2 Min	1			
74	VoltL2 Max	1			
75	VoltL2 Avr	1			

ANNEXE V

SECTEURS DE VALIDITÉ DES MESURES

Selon la norme, tous les objets situés à une distance (L_n) moindre de 20 diamètres (D_n) de l'objet étudié, affectent la validité de mesures enregistrées. Nous déterminons les secteurs de validité pour la tour météorologique et pour l'éolienne de référence (no. 6). Le *Tableau V.1* montre les objets ayant un impact sur la validité des mesures.

Tableau A5.1

Obstacles – Matane

Éolienne de référence					
Objets	Longitude	Latitude	Altitude	Ln/Dn	alpha / 2
Turbine no.4	5403637	296699	953.35	19.78	15.04
Turbine no.5	5404418	296418	130.00	2.70	35.63
Turbine no.7	5404657	296418	109.00	2.26	38.45
Turbine no.9	5404108	297204	900.78	18.69	15.30
Turbine no.10	5404246	297049	699.55	14.51	16.61
Turbine no.11	5404478	296773	361.84	7.51	21.76
Turbine no.12	5404679	296776	381.22	7.91	21.24
Turbine no.13	5404805	296725	400.37	8.31	20.78
Turbine no.14	5404934	296757	514.63	10.68	18.66
Turbine no.15	5405128	297110	902.92	18.73	15.29
Mât de référence					
Objets	Longitude	Latitude	Altitude	Ln/Dn	alpha / 2
Turbine no.5	5404418	296418	182.63	3.79	30.35
Turbine no.6	5404548	296418	149.78	3.11	33.38
Turbine no.7	5404657	296418	198.31	4.11	29.15
Turbine no.10	5404246	297049	827.46	17.17	15.7
Turbine no.11	5404478	296773	505.19	10.48	18.8
Turbine no.12	5404679	296776	528.92	10.97	18.45
Turbine no.13	5404805	296725	534.25	11.08	18.38
Turbine no.14	5404934.54	296757	636.89	13.21	17.18

L'angle alpha (en degré) est obtenu à l'aide de l'expression suivante :

$$\alpha = 1.3 \arctan(2.5 \times (L_n / D_n) + 0.15) + 10 \quad (\text{V.1})$$

Nous obtenons ainsi les secteurs de validité pour l'éolienne de référence et le mât météorologique. Ces secteurs sont montrés sur les figures suivantes.

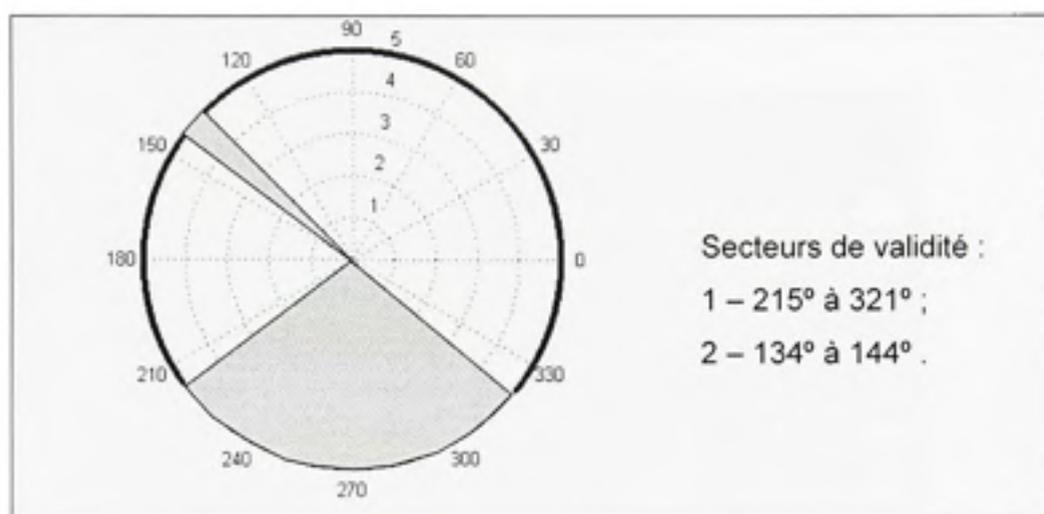


Figure A5.1 – Secteurs de validité de l'éolienne de référence.

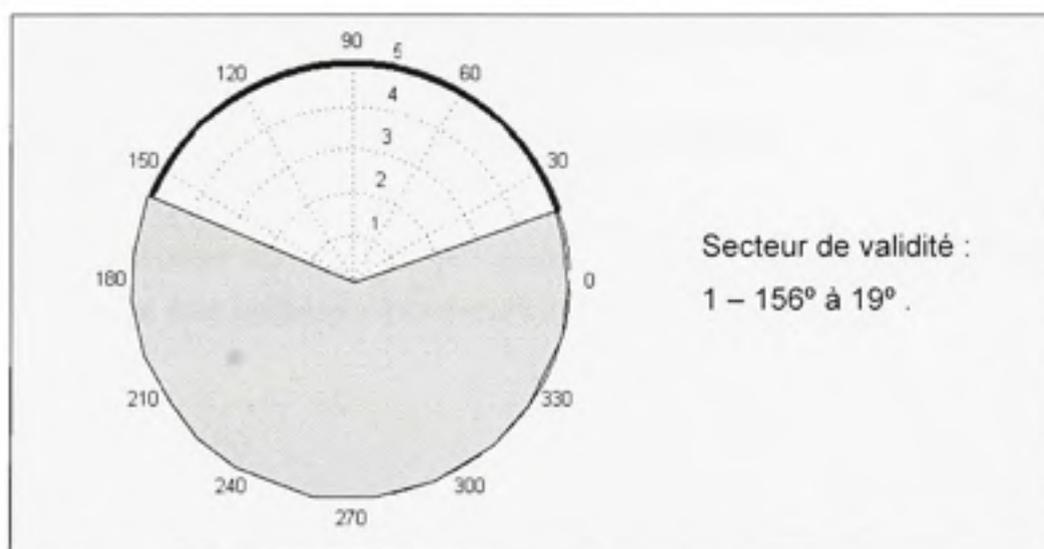


Figure A5.2 – Secteurs de validité du mât de référence.

Selon la norme, tous les objets situés à une distance (L_n) moindre de 20 diamètres (D_n) de l'objet étudié, affectent la validité de mesures enregistrées. Nous déterminons les secteurs de validité pour la tour météorologique et pour l'éolienne de référence (no. 76). Le *Tableau V.2* montre les objets ayant un impact sur la validité des mesures.

Tableau A5.2
Obstacles – Cap-Chat

Éolienne de référence					
Objets	Longitude	Latitude	Altitude	L_n/D_n	alpha / 2
Turbine no.73	5435861	357050	562.57	11.67	18.01
Turbine no.74	5435735	356845	322.01	6.68	22.98
Turbine no.75	5435468	356690	145.24	3.01	33.87
Mât de référence					
Objets	Longitude	Latitude	Altitude	L_n/D_n	alpha / 2
Turbine no.73	5435861	357050	643.52	13.35	17.11
Turbine no.74	5435735	356845	403	8.36	20.72
Turbine no.75	5435468	356690	207.79	4.31	28.48
Turbine no.76	5435558	356576	84.65	1.76	42.42

L'angle alpha (en degré) est obtenu à l'aide de l'expression suivante :

$$\alpha = 1.3 \arctan(2.5 \times (L_n / D_n) + 0.15) + 10 \quad (\text{F.2})$$

Nous obtenons ainsi les secteurs de validité pour l'éolienne de référence et le mât météorologique. Ces secteurs sont montrés sur les figures suivantes.

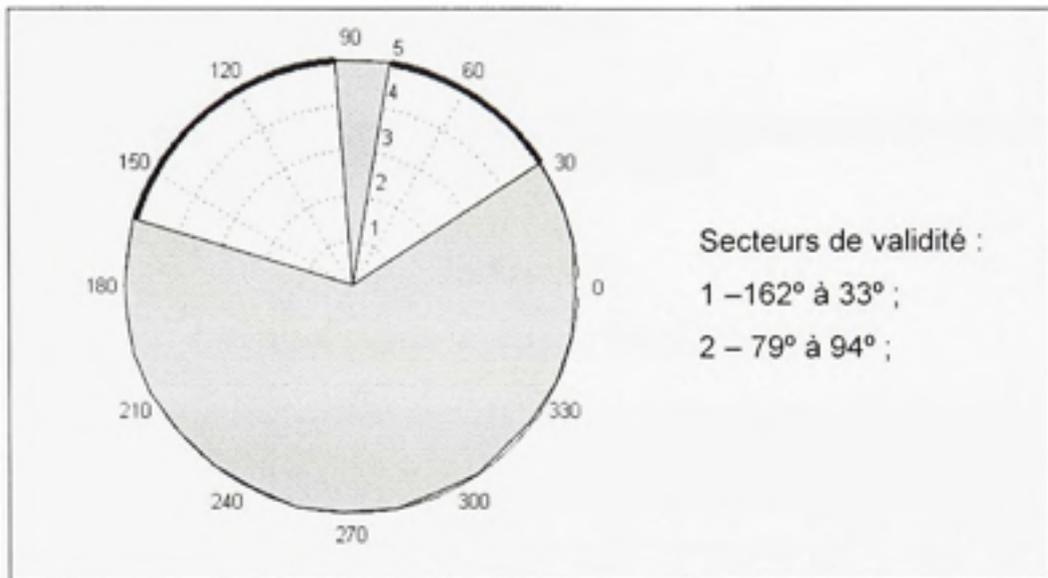


Figure A5.3 – Secteurs de validité de l'éolienne de référence.

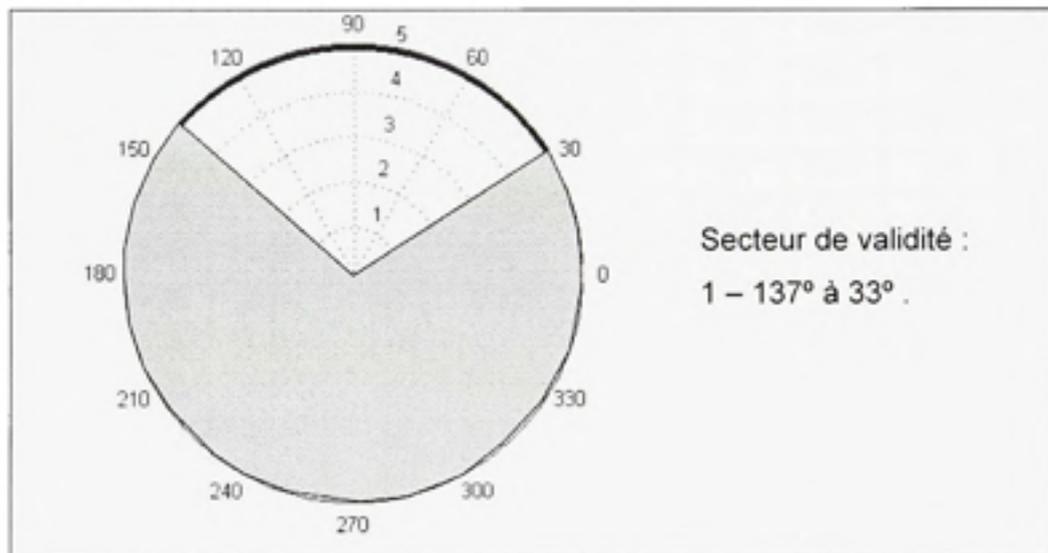


Figure A5.4 – Secteurs de validité du mât de référence.

ANNEXE VI

COMPARAISONS DES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES DURANT LES ÉVÉNEMENTS DE GIVRE

Tableau A6.1

Conditions météorologiques – Pluies verglaçantes

Nom	Mont-Joli (EC)			Matane (ANE)			Cap-Chat (ANE)		
	T (°C)	U (m/s)	Dir (°)	T (°C)	U (m/s)	Dir (°)	T (°C)	U (m/s)	Dir (°)
DHVIS-1	-5.65	2.64	067	-4.54	7.05	131	-5.14	1.93	214
DHVIS-2	-0.93	7.86	347	-1.76	6.56	196	-1.7	4.97	36
DHVIS-3	-0.95	6.92	130	-1.78	11.09	134	-2.35	1.87	165
DHVIS-4	-1.73	6.11	127	-3.78	ND	139	ND	ND	ND
DHVIS-5	-0.56	4.23	053	-1.11	3.06	83	-1.05	2.17	71
DHVIS-6	0.20	1.67	040	1.24	4.69	146	-0.22	0.96	86
DHVIS-7	-0.04	4.67	044	-0.46	4.82	107	-0.08	2.5	160
DHVIS-8	0.23	4.81	157	-1.83	15.07	149	0.74	10.14	171
DHVIS-9	-3.07	2.22	073	-4.42	5.76	121	-2.89	1.17	117
DHVIS-10	-3.60	1.67	200	-3.03	4.59	244	ND	ND	ND
DHVIS-11	-0.39	4.06	044	-0.55	4.73	107	ND	ND	ND
DHVIS-12	-4.40	0.00	000	-4.97	10.51	150	ND	ND	ND
DHVIS-13	-0.90	5.56	050	-2.08	3.69	53	-1.19	0.45	27
DHVIS-14	-1.00	9.17	140	-2.23	16.01	148	0.15	13.41	ND
DHVIS-15	0.00	4.17	140	-1.26	13.16	139	0.78	4.67	ND
DHVIS-16	-0.65	3.61	065	-0.15	2.45	111	-0.74	1.06	ND
DHVIS-17	-0.46	7.30	050	-0.48	3.99	65	-0.65	0.53	ND
DHVIS-18	-0.30	5.28	050	-0.64	3.18	61	-0.76	0.45	ND
DHVIS-19	-0.22	6.33	052	-0.83	4.34	40	-0.32	0.45	ND
DHVIS-20	-0.30	4.17	050	-1.3	2.37	40	-0.12	0.45	ND
DHVIS-21	-0.20	5.42	065	-0.66	1.99	79	-0.53	0.65	ND

Tableau A6.2

Conditions météorologiques – Brouillards givrants

Nom	Mont-Joli (EC)			Matane (ANE)			Cap-Chat (ANE)		
	T (°C)	U (m/s)	Dir (°)	T (°C)	U (m/s)	Dir (°)	T (°C)	U (m/s)	Dir (°)
DHVIS-22	-0.10	2.50	060	1.92	1.79	48	0.97	<i>ND</i>	106
DHVIS-23	-1.40	3.16	219	-1.83	4.37	355	-0.74	0.45	28
DHVIS-24	-0.37	7.04	050	-0.91	6.86	38	-0.13	1.37	40
DHVIS-25	-4.20	1.81	185	-2.54	2.11	163	-4.94	0.72	272
DHVIS-26	-0.20	0.00	000	0	1.31	79	-0.57	0.45	<i>ND</i>
DHVIS-27	-0.40	5.28	050	-0.5	5.11	40	-0.76	0.45	<i>ND</i>
DHVIS-28	-0.60	0.00	000	-1.39	3.1	40	0	0.45	<i>ND</i>
DHVIS-29	-0.10	6.67	060	-0.36	2.54	65	-0.53	0.71	<i>ND</i>
DHVIS-30	-0.80	3.06	280	-1.35	4.87	74	-0.65	5.55	<i>ND</i>

LISTE DE RÉFÉRENCES

- [1] Testere, *International Energy Outlook - 2006*. 2006, Energy Information Administration.
- [2] Manwell, J.F., J.G. McGowan, et A.L. Rogers, *Wind Energy Explained*. 2002: Wiley.
- [3] *IEA Wind Energy Annual Report*. 2005, International Energy Agency.
- [4] *Canadian Wind Energy association*. 2006 [visité le 2006 22/12]; Disponible à l'adresse: <http://www.canwea.ca/>.
- [5] *Plan stratégique 2006-2010*. 2006, Hydro-Québec.
- [6] Laakso, T., *Wind Energy Projects in Cold Climate*. 2005, Technical Research Center of Finland.
- [7] Laakso, T. et al, *State-of-the-Art of Wind Energy in Cold Climate*. 2003, International Energy Agency.
- [8] Maissan, J.F., *Wind Power Development in Sub-Arctic Conditions with Severe Rime Icing*. 2001, Circumpolar Climate Change Summit and Exposition.
- [9] Seifert, H. *Technical Requirements for Rotor Blades Operating in Cold Climate*. dans *BOREAS VI*. 2003. Finlande.
- [10] Tammelin, B. et K. Santi. *Icing in Europe*. dans *BOREAS IV*. 1998. Finlande.
- [11] Farzaneh, M. et K. Savadiev, *Icing Event Occurrence in Québec: Statistical Analysis of field Data*. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2001. **11**(1).
- [12] Nelson, V., *Wind Energy and Wind Turbine*. 1996: Alternative Energy Institute.
- [13] Leclerc, C. et C. Masson, *Abnormally High Power Output of Wind Turbine in Cold Weather : A Preliminary study*. *International Journal of Rotating Machinery*, 2003.
- [14] Betz, A., *Windenergie und Ihre Ausnutzung durch Windmühlen*. 1926: Vandenhoeck and Ruprecht.
- [15] *Wind Turbine Part 121 - Power Performance Measurements of Grid Connected Wind Turbines*. 2002, International Electrotechnical Commission.
- [16] Tammelin, B. *Ice-free Wind Sensors*. dans *BOREAS VII*. 2005. Finlande.

- [17] Carty, T. et M. McKinney. *An Assessment of Ice-free Wind Sensors for the Juneau Airport Wind System*, dans *10th Conference on Aviation, Range, Aerospace Meteorology*, 2002.
- [18] Makonnen, L. et L. Helle. *Calibration of Anemometers—An Uncertainty in Wind Energy Resource Assessment*, in *Fifth European Wind Energy Association Conference*, 1994. Greece: European Wind Energy Association.
- [19] Makonen, L., P. Lehtonen, et L. Helle. *Anemometry in Icing Condition*. American Meteorological Society, 2001. **18**(9): p. 1457-1469.
- [20] Fortin, G., J. Perron, et A. Ilinca. *Behavior and Modeling of Cup Anemometers under Icing Conditions*, dans *11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structure*, 2005. Montréal.
- [21] Kimura, S., B. Tammelin, et K. Tsuboi. *How Much Does Ice Affect Wind Speed Measurements?* dans *BOREAS V*, 2000. Levi, Finlande.
- [22] Petersen, E.L. et al, *Wind Power Meteorology*, 1997, RISO National Laboratory.
- [23] Dobesch, H., *Basic Meteorological Concepts and Recommendations for the Exploitation of Wind Energy in the Atmospheric Boundary Layer*, 2006, Central Institute for Meteorology and Geodynamics: Vienna. p. 120.
- [24] Fortin, G., *Thermodynamique de la glace atmosphérique*, 2002: Chicoutimi.
- [25] Poots, G., *Ice and Snow Accretion on Structure*, 1996: Research Studies Press Ltd, 338.
- [26] Tammelin, B. et K. Säntti. *Estimation of rime accretion at high altitude - preliminary results*, dans *BOREAS III*, 1996. Finlande.
- [27] Dobesch, H. et D. Nikolov. *Icing Measurements and Models Results from Oberstrahlach, Austria*, dans *Boreas VII*, 2005. Finlande.
- [28] Fikke, S.M., K. Säntti, et T. Laakso. *Detector for Atmospheric Icing*, dans *BOREAS VII*, 2005. Finlande.
- [29] Laakso, T. et al. *Comparison of Ice Sensors for Wind Turbine*, dans *BOREAS VI*, 2003. Finlande.
- [30] Säntti, K. et al. *Experience from Measurements of Atmospheric Icing*, dans *BOREAS VI*, 2003. Finlande.
- [31] Homola, M.C., J. Nicklasson, et A. Sundsbo, *Ice sensors for wind turbines*. *Cold Region Science and Technology*, 2006. **46**: p. 125-131.

- [32] Fortin, G., J. Perron, et A. Ilinca. *A Study of Icing Events at Murdochville. Conclusions for the Wind Power Industry.* in *Énergie éolienne et sites éloignés.* 2005. Canada.
- [33] Pinard, J.P. et J.F. Maissan. *Experience from Use of Heated Wind Sensors and Rime Ice Detectors over the Past 12 Years.* dans *BOREAS VI.* 2003. Finlande.
- [34] Tammelin, B. et al. *Wind Turbine in Icing Environment : Improvement of Tools for Siting, Certification and Operation - New Icetools.* 2005, Finnish Meteorological Institute. p. 125.
- [35] EPRI, *Green Mountain Power Wind Power Projet First Year Operating Experience : 1997-1998.* 1998, U.S Department of Energy: Palo Alto, USA.
- [36] EPRI, *Green Mountain Power Wind Power Projet Second Year Operating Experience : 1998-1999.* 1999, U.S Department of Energy: Palo Alto, USA.
- [37] EPRI, *Green Mountain Power Wind Power Projet First Year Operating Experience : 1999-2000.* 2000, U.S Department of Energy: Palo Alto, USA.
- [38] Botta, G., M. Cavaliere, et H. Holtinnen. *Ice Accretion at Acqua Spruzza and its Effects on Wind Turbine Operation and Loss of Energy Production.* dans *BOREAS IV.* 1998.
- [39] Durstewitz, M. *A Statistiscal Evaluation of Icing Failure in Germany's 250MW Wind Programme - Update 2005.* dans *BOREAS VII.* 2005. Finlande.
- [40] Jasinsky, W.J. et al. *Wind Turbine Performamnce under Icing Conditions.* in *AIAA, 35th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit.* 1997. États-Unis.
- [41] Hochart, C., et al., *Simulation en soufflerie sur un profil NACA 63-415 des conditions de givrages relevées à Murdochville durant la campagne de mesure 2004-2005 selon une éolienne Vestas-80 de 1.8 MW.* 2005, Centre intégré de recherche et transfert de technologies sur l'énergie éolienne en climat nordique. p. 107.
- [42] N.Dabin, *Optimisation de la production d'un grand parc éolien installé en climat nordique.* 2007: Montréal.
- [43] *Power curve measurements on the NEG Micon A/S NM750 (-3.3 degrés) wind turbine at Matane, Canada according to "IEC 61400-12".* 2001, Kaiser, Wilhelm and Koog GmbH.
- [44] *Power curve measurements on the NEG Micon A/S NM750 (-3.8 degrés) wind turbine at Cap-Chat, Canada according to "IEC 61400-12".* 2001, Kaiser, Wilhelm and Koog GmbH.

- [45] *Part 12-2: Verification of power performance of individual wind turbines.* 2007, International Electrotechnical Commission.
- [46] Choisnard, J., G. Lafrance, et M. Bernier, *Développement des techniques spatiales de cartographie du potentiel éolien offshore et côtier par imagerie RADARSAT : cas du golfe du St-Laurent.* VertigO - La revue en science de l'environnement, 2004. 5(1).
- [47] Francoeur, L.G., *Énergie éolienne - Axor serait victime d'un trou de vent,* dans *Le Devoir.* 2004: Montréal.
- [48] Tammelin, B., et al., *Wind Energy Production in Cold Climate,*. 2000, Finnish Meteorological Institute: Helsinki. p. 41.
- [49] Ste-Marie, G., *Le développement de la filière éolienne au Québec et ses coûts.* 2005, Chaire de recherche socio-économique de l'UQAM: Montréal.
- [50] *Logiciel RETScreen - Manuel de l'utilisateur en ligne.* 2004, Ministre des Ressources Naturelles du Canada.