

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

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

**PAR  
CHRISTOPHE PORTAIX**

**ÉTUDE DE LA PHASE D'ACCRÉTION  
DE LA GLACE ATMOSPHÉRIQUE SUR DES CÂBLES**

**MARS 2000**



### **Mise en garde/Advice**

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

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

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

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

***"Caminante, no hay camino,  
Se hace camino al andar."***

***"Passant, le chemin n'existe pas,  
Tu le fais en marchant."***

***Antonio Machado, Campos de  
Castilla.***

***À tous mes proches.***

## RÉSUMÉ

Les structures exposées à des conditions nordiques sont susceptibles d'être soumises à l'accumulation de la glace atmosphérique. Ce genre d'événement peut nuire au bon fonctionnement d'une structure en provoquant des perturbations mécaniques et/ou électriques. Les conducteurs aériens d'énergie électrique sont une catégorie de structure à haut risque car ils parcourent des régions isolées qui rendent la prévention et la maintenance très difficiles. L'étude des phénomènes de glace atmosphérique cherche à développer une connaissance qui permette de prévoir et d'estimer les dangers d'un événement afin de prendre les mesures appropriées. Le but est finalement de concevoir des tracés des lignes de transport d'énergie dont le niveau de fiabilité est maximal. Dans ce cadre, nous utiliserons les données du site de givrage naturel du Mont Valin (Québec, Canada) afin d'étudier un aspect particulier de ce domaine : l'accrétion de la glace. Par l'analyse de ces données, l'objectif de la recherche présentée ici est d'abord de déterminer les charges enregistrées dues aux effets autres que la glace, ensuite, de les utiliser pour concevoir une base de données de toutes les phases d'accrétion de la glace, et, finalement, d'approfondir l'étude de la phase d'accrétion.

Il existe trois types de glace atmosphérique dangereux pour les activités humaines : le givre, le verglas et la neige mouillée. Ils sont généralement produits par divers phénomènes atmosphériques reliés aux conditions météorologiques. L'accrétion de la glace atmosphérique est un phénomène physique complexe qui implique les aspects

thermodynamiques et fluidiques des gouttelettes d'eau surfondue et les propriétés matérielles et géométriques de la structure. Son étude sur un site expérimental demande l'application de critères objectifs qui sont applicables à tous les cas possibles.

Nous pouvons distinguer trois phases chronologiques dans un événement de givrage : la phase d'accrétion, la phase de maintien et la phase de délestage. Toutefois, les évolutions de la charge de glace ne suivent pas forcément cette séquence et ne contiennent pas toujours ces trois phases. Ainsi, pour isoler la phase d'accrétion, nous définissons un critère de fin de phase d'accrétion. Ce critère tient compte des deux paramètres suivants : la durée du maintien de la charge de glace et la proportion de glace délestée pendant l'accrétion.

Le site de givrage naturel du Mont Valin est composé de quatre conducteurs répartis sur deux lignes. La ligne principale, dont la direction est perpendiculaire aux vents dominants Est-Ouest, comporte le conducteur de 12,5 mm de diamètre, le conducteur de 35 mm de diamètre et le faisceau de quatre conducteurs de 35 mm de diamètre. La ligne témoin comprend le conducteur témoin de 7,93 mm de diamètre. Les instruments installés mesurent les données météorologiques et les charges mécaniques appliquées sur les conducteurs. Mais, dans ce genre de conditions expérimentales, les charges mesurées ne sont pas toujours expliquées par l'accumulation de glace atmosphérique.

En effet, la variation de la charge enregistrée sur les conducteurs peut être due aux effets aérodynamiques engendrés par le vent, à la dilatation thermique des conducteurs ou à la dérive électronique de l'instrumentation, et non à la glace. Notre démarche est la suivante. Nous estimons d'abord théoriquement les effets des charges aérodynamiques et de la dilatation thermique sur les conducteurs, chargés ou pas de glace. Puis, nous comparons ces résultats aux données expérimentales où nous avons isolé chaque effet. Ensuite, nous observons dans la base de données les effets de la dérive électronique. Finalement, en

utilisant les données théoriques pour valider les données expérimentales, nous déterminons un seuil de variation total de 61 g/m du signal de charge qui peut être expliqué par les effets cités ci-dessus.

Après avoir brièvement présenté les outils statistiques de corrélation et de régression, nous élaborons la base de données contenant les phases d'accrétion en appliquant le critère donné. Les analyses des distributions, de corrélation et de régression sont effectuées sur les quatre types de glace classifiés : le givre, le verglas, la neige mouillée et les mélanges, et sur les quatre types de conducteurs du site. Les études des distributions des paramètres météorologiques tels que la température de l'air et la vitesse du vent confirment bien les ordres de grandeur cités dans la littérature pour le givre, le verglas et la neige mouillée. La durée de la phase d'accrétion et le taux d'accrétion pour les mêmes types de glace présentent aussi des propriétés statistiques conformes aux données de la littérature dans le domaine. Une caractéristique propre au site du Mont Valin -où les observations de givre sont dominantes- est que la charge de givre atteinte en fin de phase d'accrétion est souvent supérieure à celle des autres types de glace. Les analyses de régression sur le taux d'accrétion montrent le lien entre cette variable et les paramètres mesurés sur le site. Le taux d'alarmes du givromètre et l'orientation du conducteur sont deux facteurs influents du taux d'accrétion du givre. Quant au verglas, le taux de précipitations est important à considérer, mais pas l'orientation du conducteur. Pour la neige mouillée, l'intensité du vent perpendiculaire au conducteur et le taux de précipitations sont les facteurs importants. Enfin, la vitesse du vent et la hauteur des précipitations sont les paramètres qui expliquent le mieux le taux d'accrétion dans le cas des mélanges.

En conclusion, nous avons déterminé une valeur de la charge enregistrée sur le site du Mont Valin qui peut être expliquée par des phénomènes autres que l'accumulation

de glace. En définissant et en appliquant un critère sur la base de données, nous avons pu étudier les caractéristiques de la phase d'accrétion et les facteurs d'influence du taux d'accrétion. Néanmoins, l'étude du type de glace noté mélanges a démontré la complexité de son interprétation statistique. Une décomposition de ce type de glace par proportions de givre et de verglas et une analyse statistique plus détaillée de ses caractéristiques mèneraient vers une meilleure compréhension des facteurs d'influence de l'accrétion de la glace atmosphérique.

## REMERCIEMENTS

Je remercie vivement mon directeur de recherche, Monsieur Jacques Druez, Professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi et Directeur de l'Équipe de Recherche en Ingénierie du Givrage des Structures (ERIGS). Je lui suis reconnaissant pour sa disponibilité et son soutien tout au long de ce travail.

Mes remerciements vont également à Madame Sylvie Bernardin pour ses discussions de grande qualité dans les domaines de la glace atmosphérique et de la statistique, et pour ses encouragements. Je la remercie aussi pour avoir accepté de faire partie de mon jury.

Je suis aussi reconnaissant envers Monsieur Jacques Carignan pour ses conseils en matière de statistique et sa gentillesse. Je le remercie également pour avoir accepté de faire partie de mon jury.

Je témoigne mes remerciements à l'égard de tous les gens sans lesquels ce projet n'aurait pas été possible, et en particulier Messieurs Marco Boudreault, assistant de recherche à l'ERIGS, Serge Gauthier, technicien de laboratoire, et Louis-Michel Gagnier.

Finalement, ces remerciements ne seraient pas complets sans mention du soutien de ma compagne et amie Sophie Gouzy. Ses encouragements et son énergie m'ont été indispensables tout au long de ce travail.



## TABLE DES MATIÈRES

<b>TITRE.....</b>	<b>i</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>iii</b>
<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>vii</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>xiii</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>xvii</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>I- NOTIONS GÉNÉRALES SUR L'ACCRÉTION DE LA GLACE ATMOSPHÉRIQUE.....</b>	<b>2</b>
<b>I-1. CLASSIFICATION DES TYPES DE GLACE ATMOSPHÉRIQUE.....</b>	<b>2</b>
<b>I-2. NOTIONS PHYSIQUES DE L'ACCRÉTION DE LA GLACE ATMOSPHÉRIQUE SUR DES CÂBLES.....</b>	<b>5</b>
<b>I-3. PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTES APPROCHES D'ÉTUDE DE L'ACCRÉTION.....</b>	<b>7</b>
<b>II- LA PHASE D'ACCRÉTION.....</b>	<b>9</b>
<b>II-1. LES TROIS PHASES D'UN ÉVÉNEMENT DE GLACE ATMOSPHÉRIQUE.....</b>	<b>9</b>
<b>II-2. LA PHASE D'ACCRÉTION.....</b>	<b>11</b>
<b>II-3. LE CRITÈRE DE FIN DE PHASE D'ACCRÉTION.....</b>	<b>12</b>
<b>III- PRÉSENTATION DES CONDITIONS EXPÉRIMENTALES.....</b>	<b>14</b>
<b>III-1. PROBLÉMATIQUE.....</b>	<b>14</b>
<b>III-2. L'INSTALLATION EXPÉRIMENTALE.....</b>	<b>15</b>

<b>III-3. L'ACQUISITION ET LE TRAITEMENT DES DONNÉES.....</b>	<b>17</b>
<b>III-4. LE SIGNAL DE LA CELLULE DE CHARGE.....</b>	<b>21</b>
<b>IV- VARIATIONS DU SIGNAL DES CELLULES DE CHARGE.....</b>	<b>22</b>
<b>IV-1. PROBLÉMATIQUE.....</b>	<b>22</b>
<b>IV-2. LES EFFORTS AÉRODYNAMIQUES.....</b>	<b>23</b>
<b>IV-2.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>23</b>
<b>IV-2.2. CALCULS THÉORIQUES.....</b>	<b>24</b>
<b>IV-2.2.1. LA FORCE AÉRODYNAMIQUE APPLIQUÉE.....</b>	<b>24</b>
<b>IV-2.2.2. RÉSULTATS THÉORIQUES.....</b>	<b>26</b>
<b>IV-2.3. DONNÉES EXPÉRIMENTALES.....</b>	<b>29</b>
<b>IV-2.3.1. CUEILLETTE DES DONNÉES.....</b>	<b>29</b>
<b>IV-2.3.2. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....</b>	<b>30</b>
<b>IV-3. LA DILATATION THERMIQUE.....</b>	<b>32</b>
<b>IV-3.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>32</b>
<b>IV-3.2. CALCULS THÉORIQUES.....</b>	<b>32</b>
<b>IV-3.2.1. ALLONGEMENT DÙ À LA DILATATION THERMIQUE.....</b>	<b>32</b>
<b>IV-3.2.2. RELATION AVEC LE SIGNAL DE LA CELLULE DE CHARGE.....</b>	<b>34</b>
<b>IV-3.2.3. RÉSULTATS THÉORIQUES.....</b>	<b>37</b>
<b>IV-3.3. DONNÉES EXPÉRIMENTALES.....</b>	<b>38</b>
<b>IV-3.3.1. CUEILLETTE DES DONNÉES.....</b>	<b>38</b>
<b>IV-3.3.2. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....</b>	<b>39</b>
<b>IV-4. LE BRUIT ET LA DÉRIVE ÉLECTRONIQUE.....</b>	<b>40</b>
<b>IV-4.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>40</b>

IV-4.2. CUEILLETTE DES DONNÉES.....	42
IV-4.3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....	42
IV-5. DÉTERMINATION DU SEUIL DE VARIATION.....	43
IV-5.1. GÉNÉRALITÉS.....	43
IV-5.2. LA COMBINAISON DES EFFETS.....	44
V- DÉMARCHÉ ET OUTILS STATISTIQUES.....	47
V-1. LA DÉMARCHÉ STATISTIQUE.....	47
V-2. ÉTUDE EXPLICATIVE.....	48
V-2.1. L'ANALYSE DE CORRÉLATION.....	48
V-2.1.1. OBJECTIFS.....	48
V-2.1.2. DÉFINITION MATHÉMATIQUE.....	49
V-2.2. L'ANALYSE DE RÉGRESSION.....	49
V-2.2.1. OBJECTIFS.....	49
V-2.2.2. DÉFINITION MATHÉMATIQUE.....	50
V-3. LE CHOIX DES VARIABLES DE RÉGRESSION.....	51
VI- PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS.....	55
VI-1. INTRODUCTION.....	55
VI-2. PLAN DE L'ÉTUDE.....	57
VI-2.1. ÉTUDE DES DISTRIBUTIONS.....	58
VI-2.2. LA RELATION ENTRE LA CHARGE ET LE TAUX D'ACCRÉTION AVEC LA DURÉE DE LA PHASE D'ACCRÉTION.....	59
VI-2.3. LE MODÈLE DE RÉGRESSION DU TAUX D'ACCRÉTION.....	60
VI-3. LE GIVRE.....	60
VI-3.1. ÉTUDE DES DISTRIBUTIONS.....	60
VI-3.1.1. LA TEMPÉRATURE.....	60

VI-3.1.2. LE VENT.....	63
VI-3.1.3. LA CHARGE DE GLACE.....	65
VI-3.1.4. LA DURÉE DE LA PHASE D'ACCRÉTION.....	66
VI-3.1.5. LE TAUX D'ACCRÉTION.....	68
VI-3.2. LA CHARGE ET LE TAUX D'ACCRÉTION EN FONCTION DE LA DURÉE DE LA PHASE D'ACCRÉTION.....	69
VI-3.3. LE MODÈLE DE RÉGRESSION DU TAUX D'ACCRÉTION.....	70
VI-4. LE VERGLAS.....	78
VI-4.1. ÉTUDE DES DISTRIBUTIONS.....	78
VI-4.1.1. LA TEMPÉRATURE.....	78
VI-4.1.2. LE VENT.....	80
VI-4.1.3. LA CHARGE DE GLACE.....	82
VI-4.1.4. LA DURÉE DE LA PHASE D'ACCRÉTION.....	83
VI-4.1.5. LE TAUX D'ACCRÉTION.....	85
VI-4.2. LA CHARGE ET LE TAUX D'ACCRÉTION EN FONCTION DE LA DURÉE DE LA PHASE D'ACCRÉTION.....	86
VI-4.3. LE MODÈLE DE RÉGRESSION DU TAUX D'ACCRÉTION.....	87
VI-5. LA NEIGE MOUILLÉE.....	94
VI-5.1. ÉTUDE DES DISTRIBUTIONS.....	94
VI-5.1.1. LA TEMPÉRATURE.....	94
VI-5.1.2. LE VENT.....	96
VI-5.1.3. LA CHARGE DE GLACE.....	97
VI-5.1.4. LA DURÉE DE LA PHASE D'ACCRÉTION.....	98
VI-5.1.5. LE TAUX D'ACCRÉTION.....	99
VI-5.2. LE MODÈLE DE RÉGRESSION DU TAUX D'ACCRÉTION.....	101

<b>VI-6. LES MÉLANGES.....</b>	<b>103</b>
<b>VI-6.1. ÉTUDE DES DISTRIBUTIONS.....</b>	<b>103</b>
<b>VI-6.1.1. LA TEMPÉRATURE.....</b>	<b>103</b>
<b>VI-6.1.2. LE VENT.....</b>	<b>105</b>
<b>VI-6.1.3. LA CHARGE DE GLACE.....</b>	<b>107</b>
<b>VI-6.1.4. LA DURÉE DE LA PHASE D'ACCRÉTION.....</b>	<b>108</b>
<b>VI-6.1.5. LE TAUX D'ACCRÉTION.....</b>	<b>110</b>
<b>VI-6.2. LE MODÈLE DE RÉGRESSION DU TAUX D'ACCRÉTION.....</b>	<b>111</b>
<b>CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....</b>	<b>118</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>121</b>
<b>ANNEXE A: IDENTIFICATION DES PHASES D'ACCRÉTION.....</b>	<b>A-1</b>
<b>ANNEXE B: FICHIERS DE TRAVAIL DE LA BASE DE DONNÉES.....</b>	<b>B-1</b>
<b>ANNEXE C: FIGURES 1 À 39.....</b>	<b>C-1</b>

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Caractéristiques des câbles.....	16
Tableau 2: Facteurs de conversion.....	20
Tableau 3-1: Variation théorique de la charge en g/m provoquée par les efforts aérodynamiques à différentes vitesses du vent avec et sans glace.....	27
Tableau 3-2: Variation relative en % de la charge appliquée sur les câbles due aux efforts aérodynamiques à différentes vitesses du vent avec et sans glace.....	28
Tableau 4: Variation expérimentale de la charge en g/m provoquée par les efforts aérodynamiques.....	30
Tableau 5: Caractéristiques techniques des câbles.....	33
Tableau 6: Variation théorique de la charge en g/m provoquée par la dilatation thermique.....	37
Tableau 7: Variation expérimentale de la charge en g/m provoquée par la dilatation thermique.....	39
Tableau 8: Variation expérimentale de la charge en g/m provoquée par le bruit électronique.....	43
Tableau 9: Caractéristiques de la température en °C dans le cas du givre.....	62
Tableau 10: Caractéristiques de la vitesse du vent perpendiculaire en km/h dans le cas du givre.....	64
Tableau 11: Caractéristiques de la charge de glace en fin de phase d'accrétion en kg/m dans le cas du givre.....	66
Tableau 12: Caractéristiques de la durée de la phase d'accrétion en heures dans le cas du givre.....	67
Tableau 13: Caractéristiques du taux d'accrétion en g/m.h dans le cas du givre.....	69
Tableau 14: Coefficients de corrélation dans le cas du givre sur le câble de garde.....	71
Tableau 15: Coefficients de corrélation dans le cas du givre sur le câble Bersimis.....	72
Tableau 16: Coefficients de corrélation dans le cas du givre sur un câble du faisceau.....	72

Tableau 17: Coefficients de corrélation dans le cas du givre sur le câble témoin.....	73
Tableau 18: Résultats de l'analyse de régression dans le cas du givre sur le câble de garde.....	74
Tableau 19: Résultats de l'analyse de régression dans le cas du givre sur le câble Bersimis.....	75
Tableau 20: Résultats de l'analyse de régression dans le cas du givre sur un câble du faisceau.....	75
Tableau 21: Résultats de l'analyse de régression dans le cas du givre sur le câble témoin.....	76
Tableau 22: Caractéristiques de la température en °C dans le cas du verglas.....	79
Tableau 23: Caractéristiques de la vitesse du vent perpendiculaire en km/h dans le cas du verglas.....	81
Tableau 24: Caractéristiques de la charge de glace en fin de phase d'accrétion en kg/m dans le cas du verglas.....	83
Tableau 25: Caractéristiques de la durée de la phase d'accrétion en heures dans le cas du verglas.....	84
Tableau 26: Caractéristiques du taux d'accrétion en g/m.h dans le cas du verglas.....	86
Tableau 27: Coefficients de corrélation dans le cas du verglas sur le câble de garde.....	88
Tableau 28: Coefficients de corrélation dans le cas du verglas sur le câble Bersimis.....	88
Tableau 29: Coefficients de corrélation dans le cas du verglas sur un câble du faisceau.....	89
Tableau 30: Coefficients de corrélation dans le cas du verglas sur le câble témoin.....	89
Tableau 31: Ordre décroissant des coefficients de corrélation avec le taux d'accrétion sur les quatre types de câbles.....	90
Tableau 32: Résultats de l'analyse de régression dans le cas du verglas sur le câble de garde.....	91
Tableau 33: Résultats de l'analyse de régression dans le cas du verglas sur le câble Bersimis.....	91

Tableau 34: Résultats de l'analyse de régression dans le cas du verglas sur un câble du faisceau.....	92
Tableau 35: Résultats de l'analyse de régression dans le cas du verglas sur le câble témoin.....	92
Tableau 36: Caractéristiques de la température en °C dans le cas de la neige mouillée.....	95
Tableau 37: Caractéristiques de la vitesse du vent perpendiculaire en km/h dans le cas de la neige mouillée.....	97
Tableau 38: Caractéristiques de la charge de glace en fin de phase d'accrétion en kg/m dans le cas de la neige mouillée.....	97
Tableau 39: Caractéristiques de la durée de la phase d'accrétion en heures dans le cas de la neige mouillée.....	99
Tableau 40: Caractéristiques du taux d'accrétion en g/m.h dans le cas de la neige mouillée.....	100
Tableau 41: Résultats de l'analyse de régression dans le cas de la neige mouillée sur le câble Bersimis.....	102
Tableau 42: Résultats de l'analyse de régression dans le cas de la neige mouillée sur un câble du faisceau.....	102
Tableau 43: Caractéristiques de la température en °C dans le cas des mélanges.....	104
Tableau 44: Caractéristiques de la vitesse du vent perpendiculaire en km/h dans le cas des mélanges.....	106
Tableau 45: Caractéristiques de la charge de glace en fin de phase d'accrétion en kg/m dans le cas des mélanges.....	108
Tableau 46: Caractéristiques de la durée de la phase d'accrétion en heures dans le cas des mélanges.....	109
Tableau 47: Caractéristiques du taux d'accrétion en g/m.h dans le cas des mélanges.....	111
Tableau 48: Coefficients de corrélation dans le cas des mélanges sur le câble de garde.....	112
Tableau 49: Coefficients de corrélation dans le cas des mélanges sur le câble Bersimis.....	113



Tableau 50: Coefficients de corrélation dans le cas des mélanges sur un câble du faisceau.....	113
Tableau 51: Coefficients de corrélation dans le cas des mélanges sur le câble témoin.....	113
Tableau 52: Résultats de l'analyse de régression dans le cas des mélanges sur le câble de garde.....	115
Tableau 53: Résultats de l'analyse de régression dans le cas des mélanges sur le câble Bersimis.....	115
Tableau 54: Résultats de l'analyse de régression dans le cas des mélanges sur un câble du faisceau.....	116
Tableau 55: Résultats de l'analyse de régression dans le cas des mélanges sur le câble témoin.....	116
Tableau 56: Identification des phases d'accrétion dans le cas du givre.....	A-2
Tableau 57: Identification des phases d'accrétion dans le cas du verglas.....	A-8
Tableau 58: Identification des phases d'accrétion dans le cas de la neige mouillée.....	A-12
Tableau 59: Identification des phases d'accrétion dans le cas des mélanges.....	A-13
Tableau 60: Fichiers de travail de la base de données de l'accrétion.....	B-2

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Complexité des phases d'un événement, le 21 octobre 1997.....	C-2
Figure 2: Complexité des phases d'un événement, le 3 décembre 1993.....	C-3
Figure 3: Événement de verglas, le 14 janvier 1995.....	C-4
Figure 4: Événement de verglas, le 9 mars 1998.....	C-5
Figure 5: Événement de verglas, le 16 octobre 1992.....	C-6
Figure 6: Événement de givre, le 7 avril 1989.....	C-7
Figure 7: Événement de givre, le 24 novembre 1991.....	C-8
Figure 8: Événement de givre, le 4 janvier 1993.....	C-9
Figure 9: Description du site de la ligne expérimentale au Mont Valin.....	C-10
Figure 10: Caractéristiques des câbles de la ligne expérimentale.....	C-11
Figure 11: Système de forces agissant sur le câble soumis à une force $f$ .....	C-12
Figure 12: Poids équivalent du câble provoqué par la force de traînée.....	C-13
Figure 13: Diagramme des corps libres d'un segment de câble soumis à une force $f$ .....	C-14
Figure 14: Variables intervenant dans les équations caténares.....	C-15
Figure 15: Distribution de la température dans le cas du givre (câble de garde).....	C-16
Figure 16: Relations entre le taux d'accrétion et la température dans le cas du givre.....	C-17
Figure 17: Distributions de la vitesse du vent perpendiculaire dans le cas du givre.....	C-18
Figure 18: Relations entre le taux d'accrétion et la vitesse perpendiculaire du vent dans le cas du givre.....	C-19
Figure 19: Distributions de la charge de glace en fin de phase d'accrétion dans le cas du givre.....	C-20
Figure 20: Distributions de la durée de la phase d'accrétion dans le cas du givre.....	C-21
Figure 21: Distributions du taux d'accrétion dans le cas du givre.....	C-22

Figure 21(suite): Distributions du taux d'accrétion dans le cas du givre.....	C-23
Figure 22: Relations entre la durée de la phase d'accrétion et la charge de glace en fin de phase d'accrétion dans le cas du givre.....	C-24
Figure 23: Relations entre la durée de la phase d'accrétion et le taux d'accrétion dans le cas du givre.....	C-25
Figure 24: Distribution de la température dans le cas du verglas (câble Bersimis).....	C-26
Figure 25: Relations entre le taux d'accrétion et la température dans le cas du verglas...	C-27
Figure 26: Distributions de la vitesse du vent perpendiculaire dans le cas du verglas.....	C-28
Figure 27: Relations entre le taux d'accrétion et la vitesse perpendiculaire du vent dans le cas du verglas.....	C-29
Figure 28: Distributions de la charge de glace en fin de phase d'accrétion dans le cas du verglas.....	C-30
Figure 29: Distributions de la durée de la phase d'accrétion dans le cas du verglas.....	C-31
Figure 30: Distributions du taux d'accrétion dans le cas du verglas .....	C-32
Figure 30 (suite): Distributions du taux d'accrétion dans le cas du verglas .....	C-33
Figure 31: Relations entre la durée de la phase d'accrétion et la charge de glace en fin de phase d'accrétion dans le cas du verglas.....	C-34
Figure 32: Relations entre la durée de la phase d'accrétion et le taux d'accrétion dans le cas du verglas.....	C-35
Figure 33: Distribution de la température dans le cas des mélanges (câble de garde).....	C-36
Figure 34: Relations entre le taux d'accrétion et la température dans le cas des mélanges.....	C-37
Figure 35: Distributions de la vitesse du vent perpendiculaire dans le cas des mélanges (câble de garde).....	C-38
Figure 36: Relations entre le taux d'accrétion et la vitesse perpendiculaire du vent dans le cas des mélanges.....	C-39
Figure 37: Distributions de la charge de glace en fin de phase d'accrétion dans le cas des mélanges.....	C-40

Figure 38: Distributions de la durée de la phase d'accrétion dans le cas des mélanges.....	C-41
Figure 39: Distributions du taux d'accrétion dans le cas des mélanges.....	C-42

## **INTRODUCTION**

Dans les pays nordiques, l'accrétion de la glace atmosphérique cause de nombreuses perturbations et pertes aux activités humaines. Pour étudier ce phénomène, les données réelles en milieu naturel sont essentielles. Ainsi, une station de givrage naturel comportant différents types de conducteurs, non électrifiés, de courte et moyenne portées, a été instrumentée sur le Mont Valin (Québec, Canada). L'objectif de la présente recherche est d'étudier l'influence des paramètres météorologiques sur l'accrétion de la glace atmosphérique à partir des données du site du Mont Valin. Par des analyses de corrélation, et de régression, nous déterminerons le rôle et l'importance des paramètres choisis dans l'accrétion.

Dans un premier temps, nous rappelons des notions générales concernant l'accrétion de la glace atmosphérique, avant de les utiliser pour la définition de la phase d'accrétion par l'application d'un critère de fin de phase d'accrétion. Ensuite, nous présentons le contexte expérimental du site de givrage naturel. Par la suite, nous déterminons un seuil de variation du signal des cellules de charge qui élimine les accrétions qui ne sont pas dues à la glace atmosphérique mais aux effets combinés des forces aérodynamiques, de la dilatation thermique et du bruit électronique. Finalement, après avoir présenté brièvement les outils statistiques, nous procédons à l'étude de la phase d'accrétion par des analyses des distributions des paramètres importants, des analyses de corrélation, et des analyses de régression sur le taux d'accrétion.

## **CHAPITRE I**

### **NOTIONS GÉNÉRALES SUR L'ACCRÉTION DE LA GLACE ATMOSPHERIQUE**

Nous présentons dans cette première partie l'accrétion de la glace atmosphérique. Nous pouvons classer trois types de glace atmosphérique particulièrement dangereux pour les structures: le verglas, le givre et la neige mouillée, qui sont produits par différents phénomènes atmosphériques: la bruine verglaçante, la pluie verglaçante, les nuages givrants, la neige, etc. L'accrétion de la glace atmosphérique sur des câbles dépend du type de glace accrétée et des caractéristiques du câble. Il existe trois approches pour étudier l'accrétion: les modèles numériques, les études en laboratoire et les études en site naturel.

#### **I-1. CLASSIFICATION DES TYPES DE GLACE ATMOSPHERIQUE**

La glace atmosphérique au niveau du sol peut être produite par deux types de phénomènes atmosphériques: les précipitations et les nuages.

Les précipitations sont des chutes de gouttelettes d'eau surfondue provenant des cristaux de glace formés en altitude selon le processus de Bergeron (Laforte, J.-L., 1998) expliqué ci-dessous. Les précipitations peuvent également apparaître par le processus de Langmuir (Laforte, J.-L., 1998); nous ne le présenterons pas car celui-ci est rare à nos latitudes. Les cristaux de glace se forment dans les nuages par congélation de gouttelettes surfondues sur des noyaux glaçogènes. Si le développement vertical des courants d'air dans

le nuage est suffisant, les cristaux de glace vont grandir par accréation des gouttelettes surfondues qu'ils rencontrent dans leur mouvement. Lorsqu'ils atteignent un certain poids, ils tombent. S'ils fondent dans leur chute, la précipitation sera de la pluie ou de la bruine. Sinon, la précipitation sera de la neige.

Le passage de nuages au niveau du sol peut également produire de la glace atmosphérique au sol. Cette situation est plus fréquente dans les régions montagneuses; elle a lieu en général à des températures inférieures à  $-5^{\circ}\text{C}$ .

Les trois types de glace atmosphérique les plus dangereux rencontrés au niveau du sol sont le verglas, le givre et la neige mouillée. Cette classification est déterminée selon des critères de transparence et de densité de la glace.

Le verglas et la neige mouillée proviennent généralement de précipitations sous forme de pluie verglaçante, de bruine verglaçante ou de neige. Le diamètre des gouttelettes d'eau surfondue varie de 0,2 mm à 5 mm. Quant au givre, il est produit par des nuages ou des brouillards givrants. Les gouttelettes d'eau surfondues sont plus fines: leur diamètre varie entre 5  $\mu\text{m}$  et 20  $\mu\text{m}$ .

Le type de glace atmosphérique qui se forme sur une structure dépend essentiellement des quatre facteurs suivants (Kuroiwa, D., 1965): la température de l'air, l'intensité du vent, le diamètre des gouttelettes et la teneur en eau de l'air.

Le verglas est une glace transparente, sans bulles d'air, à surface lisse et de densité de l'ordre de 0,8-0,9. La température ambiante est entre  $-5^{\circ}\text{C}$  et  $0^{\circ}\text{C}$ . Lorsque les gouttelettes d'eau surfondue percutent un obstacle, une partie de l'eau gèle sur l'obstacle et le reste ruisselle avant de geler ou de tomber. Ce type de glace se retrouve dans des régions humides où les températures sont douces: Terre-Neuve, le Sud du Québec, la région des grands lacs américains, la Grande-Bretagne.

Le givre peut être décomposé comme suit: le givre lourd et le givre léger. Le givre lourd est une glace dure, d'apparence opaque ou transparente selon la quantité d'air qu'elle contient. Sa surface peut être lisse ou granuleuse, et sa densité, qui est essentiellement fonction de la température de l'air et de la vitesse du vent, est de l'ordre de 0,5-0,8. Sa température de formation, qui est en général inférieure à celle du verglas, peut varier entre  $-3^{\circ}\text{C}$  et  $-15^{\circ}\text{C}$ . Le givre léger est une glace poreuse dont la surface est très granuleuse. Elle se forme à des températures plus basses que celles du givre lourd et sa densité est inférieure à 0,5. Les gouttelettes gèlent instantanément en percutant un obstacle. Nous retrouvons le givre léger dans des régions froides, sèches et en général montagneuses: les Monts Valin au Québec par exemple, le givre lourd dans des régions plus humides: le Sud du Québec, le Japon.

La neige mouillée est une précipitation qui a lieu à température légèrement positive. Sa densité est de l'ordre de celle du verglas. La précipitation ressemble à la neige mais les flocons ont une teneur en eau plus élevée. Les flocons accrètent en ruisselant autour du conducteur comme dans le cas du verglas. Ce type de glace se retrouve dans des régions humides où les températures sont douces; par exemple, le Languedoc-Roussillon en France, le Japon, la Grande-Bretagne.

La connaissance des conditions météorologiques classiques (la température de l'air, la vitesse du vent, l'humidité,...) n'est parfois pas suffisante pour déterminer le type de glace. Il faut tenir compte d'autres facteurs tels que l'altitude, la latitude, le contexte géographique ou l'état de la surface de la structure. Ainsi, pour les mêmes conditions météorologiques, nous pouvons observer différents types de glace. Par exemple, il est possible d'observer, à un site ou à des sites différents, du verglas à  $-10^{\circ}\text{C}$  et du givre à  $-5^{\circ}\text{C}$ .



Dans les sites de givrage naturel, le type de glace n'est parfois pas unique. Une tempête peut débuter par du verglas et devenir du givre à la tombée de la nuit parce que la température baisse et les nuages tombent pour devenir des nuages givrants. De même, la distinction entre les types de glace n'est pas toujours évidente car ils peuvent se ressembler beaucoup. En conclusion, cette classification ne constitue qu'une référence et elle doit être manipulée avec précaution en tenant compte du contexte de mesure et de la géographie.

## **I-2. NOTIONS PHYSIQUES DE L'ACCRÉTION DE LA GLACE ATMOSPHERIQUE SUR DES CÂBLES**

L'accrétion de la glace atmosphérique sur les câbles est un phénomène complexe qui couple les effets thermodynamiques et fluidiques des gouttelettes, les échanges thermiques câble-glace-air et les propriétés mécaniques des câbles. Le bilan thermique entre les sources de chaleur et les pertes de chaleur lors de l'accrétion d'une gouttelette d'eau surfondue sur un câble se décompose ainsi:

- pour les sources de chaleur:
  - chaleur latente de solidification de la gouttelette,
  - chaleur produite par le chauffage aérodynamique de l'air sur la glace,
  - énergie cinétique de la gouttelette captée par le câble,
  - chaleur produite par effet Joule du courant dans le câble.
  
- pour les pertes de chaleur:
  - chaleur perdue par conduction et par convection à l'interface du dépôt de glace avec l'air,

- chaleur latente due à la sublimation de la glace et à l'évaporation de l'eau dans l'air,
- chaleur perdue par conduction à travers le dépôt de glace et le câble,
- chaleur perdue par radiation.

La chaleur de chauffage aérodynamique et la chaleur de radiation peuvent être négligées. Ainsi, la thermodynamique de l'accrétion de la glace dépend de la température de l'air, de la température des surfaces extérieures et intérieures de la glace, de la température du câble, de l'intensité et de la direction du vent, du type de glace et des propriétés thermiques du câble.

Les propriétés mécaniques du câble en torsion sont également importantes à considérer. Plus un câble est rigide en torsion, moins il aura tendance à tourner sous l'effet du poids d'un dépôt de glace de forme non symétrique. La surface de capture des gouttelettes ne varie donc pas de façon importante. Dans le cas d'un câble de faible rigidité en torsion et d'un dépôt de glace de forme non symétrique, le poids de la glace fera tourner le câble. Ainsi, la surface de capture du câble sera augmentée.

La notion de surface de capture réfère à la surface apparente du câble sur laquelle peuvent s'accréter les gouttelettes. Au cours d'une accrétion, cette surface varie avec la forme du manchon et les caractéristiques de la glace formée. Ces variations aléatoires dans le temps sont difficiles à traiter et font partie des problèmes rencontrés lors de la modélisation numérique ou physique de l'accrétion.

L'accrétion sur les câbles est différente pour chaque type de glace.

Pour le verglas et la neige mouillée, les gouttelettes peuvent ruisseler avant de geler sur le câble à cause des températures de formation proches du point de congélation. Si

le conducteur est faiblement rigide en torsion, la forme du manchon de glace formé sera à peu près cylindrique. Ces deux types de glace sont dangereux car ils sont très denses.

Le givre lourd ou léger s'accumule dans la direction du vent car les gouttelettes gèlent instantanément au contact du conducteur. C'est la raison principale pour laquelle la forme du manchon est à peu près elliptique.

### **I-3. PRÉSENTATION DES DIFFÉRENTES APPROCHES D'ÉTUDE DE L'ACCRÉTION**

L'accrétion de la glace atmosphérique est un phénomène qui peut avoir des conséquences graves sur les activités humaines. Son étude occupe de nombreux ingénieurs et chercheurs (International Workshops on Atmospheric Icing of Structures, 1996, 1998). Il existe trois approches pour étudier ce problème: les modèles numériques (Chainé, P. et Castonguay, G., 1974; Lozowski, E.P. et al., 1983; Makkonen, L., 1984; McComber, P. et Turgeon, Y., 1991), les études en laboratoire (Personne, P., 1988) et les études en site naturel (Takebe, T. et al., 1998; Druez, J. et al., 1988).

Les modèles numériques sont une interprétation théorique de la physique de l'accrétion. Le désavantage de ces approximations est qu'elles ne sont valides que dans certaines conditions (Haldar, A. et al., 1996). Aucun modèle numérique ne peut prévoir toutes les conditions de l'accrétion. Néanmoins, cette approche est moins coûteuse que les deux autres, et si nous étudions des conditions précises de l'accrétion, les résultats peuvent être très satisfaisants.

Les études en laboratoire sont une simulation expérimentale de la réalité. Dans cette approche, les conditions sont contrôlées; les variations des conditions de l'accrétion sont alors artificielles. Cette approche est très intéressante car elle peut valider des modèles

numériques, mais elle peut également produire des modèles empiriques tirés de l'expérimentation.

Nous nous intéressons en particulier aux études en site naturel car ce travail s'inscrit dans cette approche.

L'accrétion de la glace atmosphérique en milieu naturel est un phénomène aléatoire car les conditions qui régissent son évolution sont essentiellement de nature météorologique. L'interprétation de données naturelles est d'autant plus complexe que les relations entre les facteurs d'influence de l'accrétion sont mal connues ou inconnues (Makkonen, L., 1984). L'approche probabilistique devient alors un outil très intéressant dans ce genre d'étude (Druez, J. et al., 1998).

Le désavantage des études en site naturel est que l'installation est très coûteuse car elle est souvent difficile d'accès et le matériel doit résister à des conditions extrêmes qui sont justement celles qui sont intéressantes (Druez, J., 1996).

Cette approche est en contact direct avec le phénomène naturel, contrairement aux deux autres. Mais, les résultats obtenus sur un site naturel sont spécifiques à celui-ci, il faut être très prudent en les extrapolant à d'autres coordonnées.

Les études effectuées sur les données de certains sites naturels se concentrent sur la validation de modèles empiriques ou numériques (McComber, P. et Govoni, J., 1985; Haldar, A. et al., 1996; McComber, P. et al., 1998), les effets couplés charge de glace et de vent (Govoni, J. et Ackley, S., 1983), la comparaison du givrage sur différents câbles (Druez, J. et McComber, P., 1991; Thorstein, E. et Eliasson, A., 1998), la comparaison du givrage entre sites (Ryerson, C., 1990), les essais ou la calibration de l'instrumentation (Wareing, J.B., 1998; Druez, J. et al., 1998), la conception des lignes et des pylônes (Stein, P.J. et al., 1998) ou les paramètres d'influence de l'évolution de la glace (Bernardin, S., 1989).

## **CHAPITRE II**

### **LA PHASE D'ACCRÉTION**

Un événement de givrage peut se décomposer selon trois phases (Druez, J. et McComber, P., 1991): l'accrétion, le maintien et le délestage. Cette séquence n'est pas toujours applicable car nous observons de nombreuses combinaisons des trois phases. Pour notre étude, nous proposons une décomposition triphasique ou diphasique pour pouvoir se concentrer sur la phase d'accrétion. L'application de cette décomposition se traduit par un critère de fin de phase d'accrétion.

#### **II-1. LES TROIS PHASES D'UN ÉVÉNEMENT DE GLACE ATMOSPHERIQUE**

Un événement de glace atmosphérique sur un câble est une évolution de la charge de glace qui débute à la charge nulle et qui finit à la charge nulle. Entre ces deux bornes, la charge de glace varie de façon aléatoire. Dans le cas idéal, nous pouvons décomposer chronologiquement un événement de glace en trois phases: d'abord la phase d'accrétion, ensuite la phase de maintien et finalement la phase de délestage.

La phase initiale d'un événement est la phase d'accrétion; c'est une phase d'accumulation rapide de la glace. Nous consacrerons la partie suivante à cette phase car elle est le sujet de ce mémoire. La phase de maintien est la phase comprise entre la phase d'accrétion et la phase de délestage (Gouzy, S., 2000); cette phase peut durer plusieurs semaines. Finalement, la phase de délestage est une phase de décroissance rapide de la

charge de glace. Selon le type de délestage (Bernardin, S., 1989), elle peut durer quelques heures ou quelques jours.

La décomposition chronologique d'un événement selon ces trois phases n'est pas toujours claire car l'événement est souvent composé d'une combinaison de celles-ci (le 21 octobre 1997, à la figure 1, et le 3 décembre 1993, à la figure 2). Les variations aléatoires de la charge de glace qui constituent ces phases sont influencées par les facteurs présentés au chapitre précédent.

Une tendance peut se distinguer selon le type de glace atmosphérique. Dans le cas du verglas, la phase de maintien est souvent inexistante (le 14 janvier 1995, à la figure 3; le 9 mars 1998, à la figure 4; et le 16 octobre 1992, à la figure 5). Les températures proches de 0°C et les vents forts favorisent un délestage rapide et rendent plus difficile le maintien de la glace sur les câbles. Quant aux événements de givre, nous pouvons fréquemment les décomposer selon les trois phases classiques (le 7 avril 1989, à la figure 6; le 24 novembre 1991, à la figure 7; et le 4 janvier 1993 à la figure 8). En général, les températures étant basses et les vents faibles, le manchon de glace peut se maintenir et délester lorsque les conditions ne sont plus favorables.

Le type de câble sur lequel s'accrète la glace atmosphérique n'est pas un facteur qui influence la décomposition triphasique de l'événement. Par contre, l'orientation du câble est un facteur d'influence important (Druez, J. et al., 1999). Un câble exposé au vent, c'est-à-dire dont la direction est perpendiculaire à celle du vent, a une surface de capture importante pour les gouttelettes et pour le vent. Ce câble accrétera plus de glace et subira plus les effets aérodynamiques qu'un autre câble de direction différente. Par exemple, dans le cas du câble témoin au Mont Valin, dont l'orientation est proche de la direction dominante du vent, les efforts aérodynamiques engendrés sur ce câble par un vent d'Est ou d'Ouest sont faibles par rapport à ceux des autres câbles. Puisque les efforts sont inférieurs,

la glace peut rester plus longtemps sur le conducteur et la phase de délestage peut être décalée. Cette propriété de la ligne témoin peut également rallonger la phase de maintien pour le câble témoin. Quant à la phase d'accrétion, l'orientation du câble témoin n'a d'influence que sur la charge de glace qui est toujours inférieure à celle des autres câbles à cause de la surface de capture petite du câble et de l'intensité de givrage plus faible car le vent perpendiculaire est plus faible.

## **II-2. LA PHASE D'ACCRÉTION**

Lorsque nous étudions l'évolution de la glace atmosphérique sur un câble, il est important de distinguer ses différentes phases (Druez, J. et McComber, P., 1991). Cette décision n'est pas objective parce que la définition des phases dépend de chacun. Dans ce qui suit, nous exposons notre conception de la phase d'accrétion. Cette définition nous permettra de définir un critère pour en déterminer les limites.

La phase d'accrétion est la phase initiale d'un événement de givrage de glace atmosphérique. Cette phase d'accumulation de la glace se distingue des autres phases par un taux d'accrétion élevé. Notons que le taux d'accrétion est la charge de glace accrétée (donc positive) entre le début et la fin de la phase, par unité de temps. La variation de la charge de glace entre deux mesures consécutives dans cette phase n'est pas forcément positive: elle peut être négative (dans le cas de délestage) ou nulle (dans le cas de maintien). Le choix d'inclure ou pas ces variations dans la phase d'accrétion fait partie de la subjectivité dans la détermination de cette phase.

Le maximum de la charge n'est pas toujours atteint pendant cette première phase, il peut également se situer pendant la phase de maintien. Par contre, la glace

s'accumule rapidement, en une à quelques dizaines d'heures. Dans le cas des infrastructures d'origine humaine, cette variation rapide peut rendre la situation critique en peu de temps.

La phase d'accrétion étant la phase initiale, elle est importante car toute évolution de la charge de glace dépend de sa propre histoire. Les propriétés physiques et géométriques de la glace atmosphérique "première" formée pendant la phase d'accrétion influencent l'évolution de la charge.

La fin de l'accrétion est un point critique pouvant mener à une évolution potentiellement dangereuse de la charge: la phase de maintien, ou à un allègement du câble: la phase de délestage.

En considérant les caractéristiques et la définition de la phase d'accrétion, il faut choisir un critère qui nous permette de détecter sa fin.

### **II-3. LE CRITÈRE DE FIN DE PHASE D'ACCRÉTION**

Ce critère a été déterminé en collaboration avec Sophie Gouzy. Il faut choisir un critère qui soit le plus objectif possible, qui s'applique à tous les cas, et que cette objectivité ne contredise ni notre conception de la phase d'accrétion ni le phénomène physique d'accrétion.

Tant que le taux d'accrétion local entre deux mesures successives est positif, la phase d'accrétion persiste. Si ce taux local devient nul ou négatif, il faut appliquer le critère.

Quand le taux local devient nul, la charge se maintient constante sur le câble. Le critère de fin de phase d'accrétion s'applique sur la durée du maintien. La durée critique au delà de laquelle la phase d'accrétion n'existe pas est de l'ordre de 24 heures. Elle n'est pas déterminée précisément car elle dépend de l'évolution générale de l'événement.



Quand le taux local devient négatif, la charge déleste; le critère s'applique sur la quantité de glace délestée. Ce nouveau seuil est égal à 25% de la charge de glace avant le délestage. Ce seuil a été déterminé à partir de l'analyse systématique d'une trentaine d'événements dont la distinction entre la phase d'accrétion et la phase de maintien est ambiguë.

Cette approche considère que la fin de la phase d'accrétion est déterminée par les effets mécaniques sur le câble plutôt que par les conditions météorologiques. La fin de la phase sera décidée à partir de l'étude du signal de charge et non de celui du givromètre.

## **CHAPITRE III**

### **PRÉSENTATION DES CONDITIONS EXPÉRIMENTALES**

Nous exposons les problèmes que peut engendrer l'étude de la phase d'accrétion à partir des données d'un site de givrage naturel. Ensuite, nous présentons l'installation expérimentale, l'acquisition et le traitement des données du site de givrage naturel du Mont Valin.

#### **III-1. PROBLÉMATIQUE**

Pour étudier les effets mécaniques de la glace atmosphérique sur les câbles, un site de givrage naturel a été installé par l'Université du Québec à Chicoutimi, en collaboration avec Hydro-Québec, dans les Monts Valin à 45 km au nord-est de Chicoutimi. Ce site recueille des données expérimentales depuis la saison 1983-1984. Nous utiliserons ces données de givrage naturel pour étudier la phase d'accrétion. Pour cela, il faut connaître les conditions météorologiques en fonction de la charge de glace sur les câbles. Or, la phase d'accrétion est une période très difficile pour l'instrumentation; elle doit effectuer un grand nombre de mesures (notamment sur le givromètre et sur le pluviomètre) tout en subissant des précipitations ou des nuages givrants. En plus de nous aider à comprendre les facteurs d'influence de la phase d'accrétion, l'analyse statistique nous informera sur les caractéristiques et sur les performances de l'instrumentation pendant cette phase. Le modèle

statistique développé sera propre au site et tiendra compte des particularités des instruments.

Pour obtenir des données valides d'un site naturel, il faut plusieurs années d'ajustements et d'expérience (Bernardin, S., 1989). Pour notre étude, nous avons trié les données disponibles recouvrant douze saisons de givrage, de 1986-1987 à 1997-1998. Les premières saisons ne sont pas entières et ont beaucoup de problèmes alors que les dernières sont satisfaisantes.

### **III-2. L'INSTALLATION EXPÉRIMENTALE**

Nous utiliserons la base de données du site de givrage naturel du Mont Valin, situé à 45 km au nord-est de Chicoutimi, Québec, Canada, à une altitude de 902 m. Cette station mesure en milieu naturel les conditions de formation et d'évolution de la glace atmosphérique sur des câbles. Elle a été développée en 1983 en collaboration avec Hydro-Québec et Radio-Québec qui ont participé à ce projet par le prêt de matériel et par l'octroi de contrats de recherche. Ce site comporte une ligne expérimentale et une ligne témoin perpendiculaires, non électrifiées, comportant quatre types de conducteurs, soit sept câbles au total (figures 9 et 10):

sur la ligne expérimentale d'une portée de 96,51 m:

- un câble de garde de diamètre 12,5 mm,
- un conducteur de type Bersimis de diamètre 35 mm,
- un faisceau de quatre conducteurs Bersimis, chacun de diamètre 35 mm, maintenus par deux entretoises.

sur la ligne témoin d'une portée de 31,40 m:

- un câble de diamètre 7,93 mm.

Les caractéristiques de ces câbles, soient le diamètre en mm, la longueur en m et le poids en N/m, sont présentées au Tableau 1.

Tableau 1: Caractéristiques des câbles

câble	diamètre (mm)	longueur (m)	poids (N/m)
câble témoin	7,93	32,62	3,26
câble de garde	12,5	97,76	7,47
câble Bersimis	35	98,11	21,42
faisceau de quatre conducteurs	35 (4x)	99,38	85,68

Les instruments de mesure sur le site sont les suivants:

- quatre cellules de charge, une sur chaque type de conducteur,
- un thermistor,
- un anémomètre,
- une girouette,
- un givromètre,
- un pluviomètre chauffant,
- une vidéo caméra avec enregistrement.

Le givromètre est une sonde qui vibre à une fréquence déterminée. Lors de l'accrétion d'une quantité calibrée de glace, sa fréquence diminue et un signal est enregistré. Ensuite, la sonde se réchauffe pour fondre la glace et le cycle recommence.

Les signaux mesurés et enregistrés sont:

- la température de l'air,
- les alarmes du givromètre,
- les précipitations,
- la vitesse du vent,
- la direction du vent,
- la tension mécanique à l'extrémité du câble de diamètre 12,5 mm,
- la tension mécanique à l'extrémité du câble de diamètre 35 mm,
- la tension mécanique à l'extrémité du faisceau de quatre câbles,
- la tension mécanique à l'extrémité du câble de diamètre 7,93 mm.

Les alarmes du givromètre et les précipitations sont cumulatives. Cinq signaux sont calculés à partir de ces mesures: la vitesse du vent perpendiculaire à la ligne expérimentale et la charge de glace moyenne par unité de longueur sur chaque type de conducteur.

### **III-3. L'ACQUISITION ET LE TRAITEMENT DES DONNÉES**

Les données que nous utiliserons pour notre étude sont les données statiques; elles sont enregistrées toutes les 30 minutes par le système d'acquisition. Elles sont le résultat d'une moyenne de 180 échantillons mesurés (soit toutes les 10 secondes) dans le

cas des cellules de charge, de 200 échantillons mesurés dans les 10 minutes précédant l'heure d'échantillonnage dans le cas de la vitesse et de la direction du vent, et d'un seul échantillon mesuré lors de l'enregistrement pour la température, le nombre d'alarmes du givromètre et la quantité d'eau du pluviomètre.

Des signaux dynamiques pour les câbles et pour le vent sont aussi enregistrés sur le site à une fréquence de 50 échantillons par seconde, par un système numérique d'acquisition de données.

Les instruments sont alimentés par une tension d'excitation en entrée; en sortie, le signal de tension de retour de chaque instrument passe par un conditionneur de signal situé dans le bâtiment de Télé-Québec. Le signal est alors acheminé vers la balise Handar d'où il sort selon un format précis. Le transfert vers le modem du Micro-Vax, au laboratoire de l'Équipe de Recherche en Ingénierie de Givrage des Structures à l'Université du Québec à Chicoutimi, se fait par communication téléphonique grâce à un téléphone cellulaire. Le signal est alors prêt pour le traitement.

Les fichiers de données sont recueillis et vérifiés tous les jours au laboratoire, et sont ensuite transférés du format .BAL sur le Vax au format .DAT sur le logiciel Excel du PC 486 par le système FTP. Cette opération change le format des fichiers de données mais pas le format des données qui sont toujours en millivolts telles que recueillies par la balise. Finalement, les fichiers de données sont traités par une macrocommande du logiciel Excel 4.0. Ces données sont directement exploitables, dans les unités physiques appropriées, sous la forme d'un classeur Excel dans lequel se trouvent 15 graphiques qui représentent les mesures en fonction du temps, le fichier des données (sous le format .DAT) utilisées pour les graphiques et la macrocommande. À chaque mois correspond un classeur qui représente toutes les cellules de charge et tous les instruments de mesure météorologique. Il est très

utile d'avoir dans le même classeur les graphiques et la macrocommande qui a permis de les créer.

Les paramètres de la macrocommande, outre les outils graphiques, sont les décalages des cellules de charge et les facteurs de conversion des câbles. Ces paramètres peuvent changer chaque mois, donc à chaque classeur; nous voyons l'utilité d'associer la macrocommande correspondant au classeur.

Les décalages des cellules de charge sont dus au poids du câble qui s'ajoute à la mesure de la charge de glace. Le calcul des décalages est effectué en début de saison et vérifié en fin de saison lorsqu'il n'y a pas de glace sur les câbles; ainsi, seuls le poids du câble et les instabilités électroniques du système de mesure provoquent le signal de la cellule de charge. Il y a souvent des différences entre les décalages de début et de fin de saison; le chercheur doit estimer à quel mois associer l'un ou l'autre des décalages. Comme nous l'avons précisé ci-dessus, ces décalages sont indiqués dans les macrocommandes de chaque classeur pour les saisons que nous avons traitées. Ils ne sont pas toujours égaux au poids du câble.

Les facteurs de conversion des câbles tiennent compte de la différence des intervalles de mesure (en anglais full scale, c'est-à dire l'échelle complète) entre la balise et les cellules de charge. Pour les canaux réservés aux cellules de charge, l'intervalle de mesure de la balise est de 1000 unités. Celui de la cellule de charge est la charge maximale qu'elle peut supporter. Il est exprimé en livres et varie, selon le type de cellule, entre 1000 pour le câble témoin et 50000 pour le faisceau de câbles. Le facteur de conversion à appliquer dans la macrocommande est égal au rapport de l'intervalle de mesure de la cellule de charge considérée et de celui de la balise. Nous présentons un tableau des facteurs de conversion pour toutes les saisons et toutes les cellules de charge au Tableau 2.

Tableau 2: Facteurs de conversion

	<b>FACTEUR DE CONVERSION</b>
<b>CELLULE DE CHARGE</b>	<b>SAISONS DE 1985 À 1998</b>
TÉMOIN diamètre = 7,93 mm	0.00602 avant novembre 1987 0.01204 à partir de novembre 1987 inclus
GARDE diamètre = 12,5 mm	0.02557
BERSIMIS diamètre = 35 mm	0.02857
FAISCEAU diamètre = 35 mm (4 fois)	0.18561

<b>ISOLATEURS</b>	<b>SAISONS DE 1985 À 1998</b>
1000 lbs	0.45351
2000 lbs	0.90703



### III-4. LE SIGNAL DE LA CELLULE DE CHARGE

La cellule de charge mesure la tension longitudinale appliquée sur le câble. Cette tension est directement reliée aux charges appliquées selon les formules développées ci-après.

Les notations sont indiquées dans la figure 11. Lorsque le câble est soumis à une force quelconque par unité de longueur  $f$ , les tensions  $T_1$  et  $T_2$  (en N) aux deux poteaux se déduisent des équations d'équilibre statiques projetées selon  $Ox$  et  $Oy$ . Les angles  $\theta_1$  et  $\theta_2$  sont respectivement les angles que fait le câble avec l'horizontale aux poteaux 1 et 2. Ils ont été mesurés sur le site (voir la figure 10) et sont supposés constants en première approximation. En projetant les équations d'équilibre selon  $Ox$ , nous obtenons:

$$-T_1 \cdot \cos\theta_1 + T_2 \cdot \cos\theta_2 = 0 \quad (1)$$

$$\Rightarrow T_2 = T_1 \cdot \frac{\cos\theta_1}{\cos\theta_2} \quad (2)$$

De même, selon  $Oy$ :

$$-f \cdot L + T_1 \cdot \sin\theta_1 + T_2 \cdot \sin\theta_2 = 0 \quad (3)$$

Nous en déduisons la tension lue  $T_1$ , à partir des équations (2) et (3):

$$-f \cdot L + T_1 \cdot \sin\theta_1 + T_1 \cdot \cos\theta_1 \frac{\sin\theta_2}{\cos\theta_2} = 0$$

$$\text{Soit} \quad T_1 = \frac{f \cdot L}{\cos\theta_1 \cdot (\tan\theta_1 + \tan\theta_2)} \quad (4)$$

## **CHAPITRE IV**

### **VARIATIONS DU SIGNAL DES CELLULES DE CHARGE DUES AUX EFFETS AUTRES QUE L'ACCRÉTION DE GLACE**

Afin d'identifier les variations du signal des cellules de charge sur les câbles qui sont uniquement dues à l'accrétion de glace atmosphérique, nous déterminons un seuil de ce signal qui tient compte des effets suivants: les effets aérodynamiques, la dilatation thermique et la dérive électronique. Ce seuil représentatif est calculé à partir de l'analyse des données du site et comparé à une approche théorique. Les calculs théoriques sont effectués en configuration avec et sans glace sur les câbles. Le seuil peut être appliqué à la base de données du Mont Valin; ainsi, toutes les variations du signal des cellules de charge inférieures à cette valeur doivent être considérées avec précaution.

#### **IV-1. PROBLÉMATIQUE**

À partir des enregistrements des cellules de charge effectués sur les câbles du site du Mont Valin, nous pouvons étudier la variation de la masse de glace en fonction du temps. Le signal des cellules de charge varie lorsque des charges sont appliquées sur les câbles, telles que le poids de la glace sur les câbles ou les efforts aérodynamiques du vent. Ce signal varie également sous l'effet de la dilatation thermique des câbles qui crée une variation de la tension mécanique sur les cellules de charge. Quant à la dérive électronique de l'instrumentation, elle influence le signal en sortie de la chaîne de mesure. La vitesse du vent perpendiculaire à la ligne principale peut atteindre des valeurs moyennes d'environ 60

km/h (17 m/s). Les écarts de la température ambiante excèdent rarement 10°C sur un intervalle de temps de vingt quatre heures; cela arrive surtout au mois de mai.

Ainsi, même si la présence de glace n'est pas certaine, le signal des cellules de charge peut varier de façon significative. Pour remédier à cette situation, nous déterminons une valeur de la variation du signal des cellules de charge qui peut être provoquée par les trois effets cités ci-dessus. Ainsi, en dessous de ce seuil, les variations du signal pourraient être entièrement expliquées par des effets autres que la glace.

Nous étudions les trois composantes perturbatrices citées. D'abord, nous développons une théorie de ces effets sur les câbles. Ensuite, nous analysons les données du site pour trouver les effets réels. Enfin, en comparant les deux approches, nous combinons les trois effets afin de trouver un seuil représentatif.

Auparavant, sur le site du Mont Valin, le seuil était fixé à 165 g/m (Druez, J. et McComber, P., 1996). Les raisons pour ce choix n'étaient pas liées aux caractéristiques physiques des câbles mais au fait que la grande majorité des événements intéressants était au dessus de ce seuil: leur influence sur la statistique était négligeable. Ici, nous déterminons ce seuil par des considérations sur la mécanique des câbles.

## **IV-2. LES EFFORTS AÉRODYNAMIQUES**

### **IV-2.1. INTRODUCTION**

La station de recherche est à une altitude de 902 mètres, dans le corridor des vents du Fjord du Saguenay. La ligne principale est dirigée perpendiculairement à la direction préférentielle Est-Ouest des vents et la ligne témoin est presque perpendiculaire à la ligne principale. Cette caractéristique, bien que très intéressante pour l'étude de la glace atmosphérique, fait que la force de traînée pourrait être importante sur la ligne principale.

L'intensité du vent peut atteindre des valeurs de 60 km/h (17 m/s); cette valeur est le résultat d'une moyenne de 200 échantillons enregistrés pendant les 10 minutes avant l'acquisition des données par le système d'acquisition.

Les forces aérodynamiques qui s'appliquent sur les câbles peuvent avoir une influence sur le signal des cellules de charge. Dans le cas où il n'y a pas de glace sur le câble, la force de traînée engendrée par les forces aérodynamiques induit une erreur sur la mesure du poids du câble (figure 12). La tension mesurée est alors une estimation du poids équivalent du câble, c'est-à-dire de la charge cumulée vent-poids du câble. Si le conducteur est chargé en glace, il faut rajouter au poids du câble ci-dessus l'intensité due à la glace et son effet sur la force aérodynamique de traînée. De la même façon que sans glace, la tension mesurée est une estimation de la charge cumulée poids du câble-poids de la glace-vent.

Dans un premier temps, nous estimons théoriquement la force aérodynamique exercée sur les câbles, avec et sans glace, et son influence sur les mesures des cellules de charge. Ensuite, nous comparons ces résultats à ceux déduits des données expérimentales de la station de recherche.

## **IV-2.2. CALCULS THÉORIQUES**

### **IV-2.2.1. LA FORCE AÉRODYNAMIQUE APPLIQUÉE**

Sept câbles différents non électrifiés sont installés sur le site: deux conducteurs simples et un faisceau de quatre câbles sur la ligne principale, et un conducteur simple sur la ligne témoin. Ils sont tous composés de torons d'acier ou d'aluminium. Pour les plus gros conducteurs, servant au transport de l'énergie électrique, les torons d'aluminium entourent les torons d'acier.

L'air en écoulement autour d'un câble exerce des forces aérodynamiques qui ont deux composantes dans le plan d'une section droite du câble: la force de traînée et la force de portance. Nous pouvons supposer, sans faire une grande erreur, que la forme du câble est symétrique par rapport à la direction du vent. Dans le cas où l'accrétion de glace est faible, cette hypothèse est encore valable. Ainsi, la force de portance peut être négligée. La force de traînée est de même direction et de même sens que le vent perpendiculaire à la section considérée.

La force de traînée totale  $F_T$  (en N) exercée sur un câble de diamètre  $D$  (en m), de longueur  $L$  (en m) et de section circulaire par un écoulement d'air de vitesse  $V$  (en m/s), l'air étant de masse volumique  $\rho_{air}$ , est:

$$F_T = \frac{l}{2} \times C_T \rho_{air} D L V^2 \quad (5)$$

Le coefficient de traînée  $C_T$  (sans dimension) est fonction de la géométrie du câble, de sa rugosité, de la viscosité et de la vitesse de l'air, et du niveau de turbulence de l'écoulement autour du câble. Dans les conditions de mesure du site, nous pouvons estimer que  $C_T \cong 1$  (McComber et al., 1983). Dans les conditions normales de température et de pression, la masse volumique de l'air  $\rho_{air}$  est de 1,3 kg/m<sup>3</sup>. Il est tout à fait raisonnable de supposer que cette valeur est constante dans nos mesures.

En remplaçant les valeurs de  $C_T$  et de  $\rho_{air}$ , l'expression finale de la force de traînée  $F_T$  exercée sur tout le câble est fonction des caractéristiques géométriques du câble et des propriétés dynamiques de l'écoulement d'air:

$$F_T = 0,65 \times D L V^2 \quad (6)$$

Considérons une longueur unitaire du câble. Dans le cas où le conducteur n'est pas chargé en glace, la force de traînée par unité de longueur  $f_t = F_t / L$  (en N/m) entraîne une variation du poids équivalent du câble par unité de longueur  $p_e$  (en N/m) en relation avec le poids du câble par unité de longueur  $w_c$  (en N/m) selon la figure 12. Si le conducteur est chargé en glace, le poids du câble doit être remplacé par sa somme avec le poids de la glace, de même direction et de même sens, et la force de traînée sera plus importante car le diamètre du câble aura augmenté. Dans toute la suite de ce chapitre, pour des raisons de clarté, nous notons sans distinction  $w_c$  la charge verticale par unité de longueur appliquée sur le câble, car le calcul est identique dans les deux cas, avec et sans glace. Par égalité vectorielle, le poids équivalent par unité de longueur  $p_e$  est:

$$p_e = \sqrt{w_c^2 + f_t^2} \quad (7)$$

Ainsi, la force appliquée sur le câble devient  $p_e$  en tenant compte des effets du vent. La variation de la charge mécanique en N/m due aux efforts aérodynamiques est la différence de cette quantité avec  $w_c$ .

#### IV-2.2.2. RÉSULTATS THÉORIQUES

Pour obtenir la variation de charge par unité de longueur de câble en kg/m, il suffit de diviser la charge en N/m par l'accélération de la pesanteur.

Dans le cas où le conducteur n'est pas chargé en glace, les résultats de la variation de charge en g/m due à la variation de la vitesse du vent perpendiculaire à la ligne sur deux types de conducteurs sont présentés dans les tableaux 3-1 et 3-2. Dans le cas d'un chargement de glace de 1 kg/m, les résultats sont également présentés dans le tableau 3.

Nous avons choisi cette charge parce qu'elle est très fréquente sur les câbles, c'est donc la charge la plus probable pour subir les effets du vent. Pour les calculs de la force de traînée, nous avons supposé que le manchon de glace formé était de forme cylindrique et que la densité de la glace était de 0,8 bien que dans la littérature la densité de référence soit de 0,9. Nous avons choisi cette densité parce que le givre est observé au site du Mont Valin avec une plus grande fréquence que le verglas de densité proche de 0,9. Ainsi, prendre cette dernière densité ne serait pas en accord avec les vraies conditions de mesure.

Les câbles étudiés sont le câble Bersimis de diamètre 35 mm et le câble de garde de diamètre 12,5 mm. Le comportement aérodynamique du faisceau de quatre câbles Bersimis est considéré équivalent à celui de quatre conducteurs Bersimis simples. Le conducteur témoin n'a pas été étudié parce que les effets aérodynamiques sur celui-ci sont trop faibles en raison de son orientation.

Tableau 3-1: Variation théorique de la charge en g/m provoquée par les efforts aérodynamiques à différentes vitesses du vent avec et sans glace

vitesse du vent en km/h (m/s)	sans glace		avec 1 kg/m de glace	
	Bersimis	garde	Bersimis	garde
10 (3)	0,09	0,03	0,16	0,2
36 (10)	12	4	20	21
72 (20)	188	68	310	320

Dans les deux cas, la force de traînée est plus importante sur le conducteur Bersimis car son diamètre est supérieur à celui du câble de garde. La variation de la charge due à la force de traînée avec la charge de 1 kg/m de glace est supérieure à celle sans glace

pour le câble de garde. Dans le cas du Bersimis, la variation de charge sans glace est supérieure. Ainsi, pour une même charge de glace, les efforts aérodynamiques ont plus d'effet sur le câble de garde que sur le câble Bersimis. Ce comportement est relié à une variation plus importante, sur ce premier câble, de la traînée par rapport au chargement vertical.

Tableau 3-2: Variation relative en % de la charge appliquée sur les câbles due aux efforts aérodynamiques à différentes vitesses du vent avec et sans glace

vitesse du vent en km/h (m/s)	sans glace		avec 1 kg/m de glace	
	Bersimis	garde	Bersimis	garde
10 (3)	0,004	0,004	0,005	0,009
36 (10)	0,5	0,6	0,6	1,2
72 (20)	8,6	9	10	18

Pour les variations de vitesse du vent de 10 km/h (3 m/s) et de 36 km/h (10 m/s), les variations relatives de la charge appliquée sur les câbles due aux efforts aérodynamiques sont inférieures à 1%. Lorsque les câbles sont chargés en glace, les variations relatives sont plus importantes que sans glace, notamment sur le câble de garde. Pour une variation de vitesse du vent de 72 km/h (20 m/s), les variations relatives avec et sans vent varient entre 8,6% et 18%. Une telle valeur moyenne de la vitesse du vent est toutefois exceptionnelle en conditions de givrage. Les variations maximales sont atteintes dans les cas où les câbles sont chargés de glace.



### **IV-2.3. DONNÉES EXPÉRIMENTALES**

#### **IV-2.3.1. CUEILLETTE DES DONNÉES**

Pour déterminer l'effet des forces aérodynamiques sur le signal à partir des données expérimentales, nous considérons deux enregistrements à deux instants différents où il n'y a pas de glace sur les câbles. Afin de s'assurer qu'il n'y a pas de glace, nous choisissons deux enregistrements précédés de températures positives pendant lesquels aucune alarme du givromètre n'a été enregistrée.

En choisissant ces deux signaux de telle sorte que leurs températures soient identiques, nous éliminons les effets de la dilatation thermique. Ainsi, la variation du signal sera uniquement due aux forces aérodynamiques.

La vitesse du vent considérée pour nos calculs est la vitesse perpendiculaire déduite des mesures d'intensité et de direction du vent. Pour que les conditions de mesure soient semblables, et donc que les mesures soient comparables, l'intervalle de temps entre les deux enregistrements doit être de l'ordre de la période du vent. Cette période de variation est de l'ordre de quelques heures.

Pour le choix de notre période de référence, il faut également tenir compte d'un dernier paramètre météorologique: la direction du vent. Ce paramètre est important pour la répétabilité de la mesure car il est étroitement lié aux propriétés physiques du vent. Celles-ci ont certainement une influence sur les efforts aérodynamiques.

En observant la base de données, nous voyons que la variation d'intensité du vent la plus fréquente entre deux enregistrements successifs de la balise est de l'ordre de 5km/h (1,4 m/s). Mais, pour corriger notre modèle théorique, il nous faut des variations d'intensité plus dispersées. En choisissant des valeurs dispersées, nous risquons d'exploiter une donnée non représentative du signal des cellules de charge car l'acquisition des mesures

liées au vent s'effectue seulement pendant les dix minutes précédant l'enregistrement de la balise. Le temps d'acquisition du signal des cellules de charge est de 30 minutes. Pour respecter ce critère, il faut que la valeur de l'intensité soit semblable sur quelques enregistrements de la balise (soit quelques demi-heures). La mesure sera bien dans une tendance générale et bien représentative.

#### IV-2.3.2. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les résultats expérimentaux relatifs aux charges aérodynamiques sont présentés dans le tableau 4 pour trois types de conducteurs. La classe 1 regroupe les intensités du vent entre 0 et 10 km/h, la classe 2 entre 10 et 20 km/h et la classe 3 entre 20 et 30 km/h. Les moyennes de l'intensité du vent perpendiculaire des classes 1, 2 et 3 sont respectivement de 8 km/h (2 m/s), de 12 km/h (3 m/s) et de 25 km/h (7 m/s).

Tableau 4: Variation expérimentale de la charge en g/m  
provoquée par les effets aérodynamiques

type de conducteur	Bersimis			garde			un câble du faisceau		
classe	1	2	3	1	2	3	1	2	3
moyenne	4	4	7	3	3	3	3	5	6
maximum	14	14	20	8	14	10	9	14	14

Les valeurs moyennes et maximales des tensions des câbles sont semblables pour les classes 1 et 2 car les moyennes d'intensité du vent entre ces deux classes sont proches. Les valeurs de la moyenne et du maximum sont minimales et plus stables que

celles des autres câbles dans le cas du câble de garde dont le diamètre est minimal. Elles sont maximales et plus variables que les autres pour le faisceau de quatre câbles.

Pour interpréter ces résultats, il est important de considérer l'échantillonnage de mesure de l'intensité du vent et de la tension des cellules de charge. Rappelons que l'acquisition des données se fait toutes les 30 minutes en faisant la moyenne des mesures enregistrées. Pour les cellules de charge, ces mesures sont prises toutes les 10 secondes pendant les 30 minutes d'enregistrement. Pour l'intensité du vent, l'enregistrement des données se fait pendant les 10 minutes qui précèdent l'acquisition et la mesure résulte de la moyenne de 200 échantillons pris à intervalles réguliers de 3 secondes. Cette façon de mesurer l'intensité du vent provient de la météorologie. Il y a alors 20 minutes de valeurs du vent non enregistrées alors que les signaux des cellules de charges sont mesurés. Cette lacune peut expliquer quelques unes des différences entre les résultats expérimentaux et théoriques.

En comparant les signaux moyens des classes 1 et 2 aux valeurs théoriques à 10 km/h (2,7 m/s), nous voyons que la théorie sous-estime les données expérimentales d'un facteur supérieur à dix. Par contre, la théorie appliquée à un vent de 36 km/h (10 m/s) approche convenablement la moyenne de tension de classe 3 dont l'intensité du vent est considérablement plus faible: 25 km/h (7 m/s).

En comparant les valeurs maximales de la classe 3 qui se réalisent à 30 km/h (8 m/s) et les valeurs théoriques à 36 km/h (10 m/s), l'approximation théorique est bonne. Cette remarque ne s'applique qu'aux câbles Bersimis et de garde. Pour la classe 1, les valeurs maximales diffèrent de l'estimation théorique.

### **IV-3. LA DILATATION THERMIQUE**

#### **IV-3.1. INTRODUCTION**

La dilatation thermique est une source de variation de tension du câble qui est provoquée par des changements de la température du câble. Au Mont Valin, les variations de la température de l'air sur un intervalle de 24 heures peuvent atteindre des valeurs de 20 °C. Ces variations ont été constatées tant au mois de novembre avec une chute de température qu'au mois de janvier avec un redoux. Bien que ces valeurs ne dépassent pas en général 10°C, il faut tout de même tenir compte de la dilatation thermique pour définir le seuil des petites tempêtes. Les variations de température sont dictées par le cycle solaire et le passage de fronts météorologiques.

#### **IV-3.2. CALCULS THÉORIQUES**

##### **IV-3.2.1. ALLONGEMENT DÛ À LA DILATATION THERMIQUE**

Pour calculer l'effet de la dilatation thermique sur le signal des cellules de charge, nous comparons le signal lu à vide à celui avec dilatation. Sachant que la dilatation thermique modifie la longueur du câble, nous calculons d'abord cet allongement. Ensuite, grâce aux équations caténaïres du câble, nous calculons la tension créée sur les cellules de charge pour cette nouvelle longueur du câble. Finalement, nous sommes en mesure de comparer les tensions à vide et avec dilatation thermique pour trouver la variation cherchée.

La déformation  $\varepsilon$  (sans dimension) d'un matériau dû à la dilatation thermique est exprimée en fonction de la variation de température  $\Delta\Theta$  (en °C) et du coefficient linéique de dilatation thermique  $\alpha$  ( en m/°C.m) du câble considéré (Tableau 5) selon la formule suivante:

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta\Theta$$

De plus, la déformation  $\varepsilon$  (sans dimension) est également définie comme l'allongement  $\delta l$  (en m) par unité de longueur  $L$  (en m) d'après la formule:

$$\varepsilon = \delta l / L$$

En combinant ces deux dernières équations, l'allongement dû à la dilatation thermique est défini en fonction du coefficient linéique de dilatation thermique du câble  $\alpha$  (en  $\text{m}/^\circ\text{C}\cdot\text{m}$ ), de la longueur du câble  $L$  (en m) et de la variation de température  $\Delta\Theta$  (en  $^\circ\text{C}$ ):

$$\delta l = \alpha \cdot L \cdot \Delta\Theta$$

Tableau 5: Caractéristiques techniques des câbles

code	CDG11BF	BERSIMIF
nom	câble d'acier	Bersimis
diamètre (mm)	11	35,1
toronnage	7/16-gr160	42-07 ACSR
poids (N/m)	5,66	21,42
masse (kg/m)	0,577	2,185
résistance limite (kN)	76,9	154,3
module d'élasticité ( $10^6$ kPa)	172,4	62
coefficient linéique de dilatation ( $/^\circ\text{C}$ )	12,1	21,2

#### IV-3.2.2. RELATION AVEC LE SIGNAL DE LA CELLULE DE CHARGE

La variation de la température ambiante provoque un changement de la géométrie du câble par un allongement proportionnel de sa longueur. Cette variation de longueur a pour effet de changer les angles des conducteurs aux deux attaches, et donc, la tension lue par la cellule de charge. Pour relier l'allongement à la tension mécanique, il faut résoudre les équations caténares du câble (Pytel, A. et Kiusalaas, J., 1994).

Considérons d'abord un segment de câble de densité uniforme  $w$  (en N/m), comme indiqué sur la figure 13. Choisissons le point le plus bas du caténaire O comme origine de notre repère. Le diagramme des corps libres inclut une tension  $T$  à une extrémité et  $T_0$  à l'autre extrémité O. La tension  $T$  fait un angle  $\theta$  avec l'horizontale. L'équilibre mécanique selon Ox de ce segment de câble montre que la composante horizontale de la tension dans le câble est une constante  $T_0$ :

$$T \cdot \cos \theta = T_0 \quad (8)$$

En utilisant les relations mécaniques et géométriques de notre système, nous obtenons la relation suivante qui exprime l'abscisse curviligne  $s$  en fonction de l'abscisse cartésienne  $x$  centrée au point O:

$$s(x) = \frac{T_0}{w} \times \sinh \frac{w \cdot x}{T_0} \quad (9)$$

De même, nous pouvons définir l'ordonnée  $y$ , qui décrit la forme caténaire prise par le câble, en fonction de l'abscisse  $x$ :

$$y(x) = \frac{T_0}{w} \cdot \left( \cosh \frac{w \cdot x}{T_0} - 1 \right) \quad (10)$$

Finalement, en manipulant à nouveau les équations géométriques et mécaniques du segment de câble, nous déterminons la tension  $T$  du câble en fonction de l'abscisse  $x$ :

$$T(x) = T_0 \cdot \cosh \frac{w \cdot x}{T_0} \quad (11)$$

Avec les équations caténaires développées ci-dessus, nous pouvons correctement poser le système d'équations qui nous permet de résoudre la tension dans le câble en fonction des données de notre ligne.

Dans tout ce qui suit, nous utilisons les variables définies dans la figure 14. Pour un câble donné, soumis uniquement à son propre poids, de longueur  $L$  (en m), de poids par unité de longueur  $w$  (en N/m), de portée  $l$  (en m) et dont la différence de hauteur entre les attaches est de  $h$  (en m), nous avons le système suivant de trois équations à trois inconnues  $T_0$  (en N),  $l_a$  (en m) et  $\theta_1$  (en°):

$$\frac{T_0}{w} \cdot \left( \cosh \frac{w \cdot l_a}{T_0} - \cosh \frac{w \cdot (l - l_a)}{T_0} \right) = h \quad (12)$$

$$\frac{T_0}{w} \cdot \left( \sinh \frac{w \cdot l_a}{T_0} - \sinh \frac{w \cdot (l - l_a)}{T_0} \right) = L \quad (13)$$

$$\cosh \left( \frac{w \cdot l_a}{T_0} \right) = \frac{1}{\cos \theta_1} \quad (14)$$

- l'équation (12) dérive des équations (8) et (9). Ces deux équations donnent:

$$w \cdot y(x) = T(x) - T_0 \quad (15)$$

Si nous appliquons l'équation (15) aux deux points A et B, H étant la flèche de la portée (en m),  $T_1$  et  $T_2$  les tensions (en N) aux points d'attache A et B respectivement, nous obtenons le système:

$$\begin{aligned} w \cdot H &= T_1 - T_0 \\ w \cdot (H - h) &= T_2 - T_0 \end{aligned}$$

En combinant ces deux équations, nous obtenons l'équation (15) sous la forme:

$$T_1 = T_2 + w \cdot h$$

- l'équation (13) indique que la longueur du câble est égale à la somme de  $s(l_a)$  et de  $s(l_b)$ , en utilisant la définition de  $s(x)$  de l'équation (11).

- l'équation (14) est déduite de l'équation (8) appliquée au point A, en remplaçant  $T_1$  par sa valeur selon (11), soit:

$$T_0 = T_1 \cdot \cos \theta_1 = T_0 \cdot \cosh \frac{w \cdot l_a}{T_0} \cdot \cos \theta_1$$

Ainsi, connaissant la longueur du câble après dilatation thermique, nous calculons la nouvelle tension créée sur la cellule de charge. La différence entre la tension initiale et de la tension après dilatation donne l'effet de température sur la cellule de charge.



La résolution de ce système d'équations non-linéaires a été effectuée par le logiciel de calcul mathématique MATHCAD PLUS 6.0. La précision des résultats est de l'ordre du milliè.

#### IV-3.2.3. RÉSULTATS THÉORIQUES

Les résultats obtenus pour les trois types de conducteurs: Bersimis, garde et un câble du faisceau, et pour deux écarts de température: 10°C et 20°C, sont présentés dans le tableau 6 ci-dessous. Le coefficient linéique de dilatation du câble de garde a été considéré égal à celui d'un câble d'acier de diamètre 11 mm (Tableau 5). Le câble Bersimis est identique à celui présenté dans ce tableau. Nous avons profité de ces calculs pour confirmer les mesures d'angle faites sur le site avant 1990 et en 1994.

Tableau 6: Variation théorique de la charge en g/m provoquée par la dilatation thermique

	type de conducteur		
variation de température (°C)	Bersimis	garde	un câble du faisceau
+10	-20	-6	-32
+20	-41	-12	-63

Une variation de température positive, c'est-à dire un réchauffement, dilate le câble: sa longueur augmente. La tension exercée sur la cellule de charge sera alors plus faible. Par contre, dans le cas d'un refroidissement, la température diminue, la longueur du câble aussi, et la tension augmente.

La variation de tension est, dans l'ordre croissant, sur le garde, le Bersimis et un câble du faisceau. Cet ordre est le même que les coefficients de dilatation linéique respectifs. La dilatation maximale est constatée sur le câble du faisceau pour les deux variations de température. Pour des variations de température de  $+10^{\circ}\text{C}$  et de  $+20^{\circ}\text{C}$ , le signal varie respectivement de  $-32\text{ g/m}$  et de  $-63\text{ g/m}$ . Un câble Bersimis du faisceau se dilate plus que le Bersimis seul pour la même variation de température car sa flèche est supérieure. Sur tous les câbles, la relation entre la variation de tension et de température est quasi-linéaire.

### **IV-3.3. DONNÉES EXPÉRIMENTALES**

#### **IV-3.3.1. CUEILLETTE DES DONNÉES**

L'étude de l'effet de la dilatation thermique sur le signal à partir des données expérimentales se fait comme dans le cas des effets aérodynamiques; nous considérons deux enregistrements à deux instants différents où il n'y a pas de glace sur les câbles. En choisissant deux enregistrements précédés de températures positives et pendant lesquels aucune alarme du givromètre n'a été enregistrée, nous nous assurons qu'il n'y a pas de glace.

Les effets aérodynamiques sont éliminés en choisissant deux signaux de manière à ce que les vitesses du vent perpendiculaire soient identiques. Ainsi, la variation du signal sera essentiellement due à la dilatation thermique des câbles.

Entre les deux enregistrements, toutes les propriétés mesurées du vent doivent être identiques; c'est-à-dire son intensité et sa direction.

La période de variation de la température dépend du cycle solaire. Dans la base de données, nous voyons bien cette influence et nous constatons que la période de variation est de l'ordre de 12 heures. Pour obtenir des données représentatives de la variabilité de la

température, l'intervalle de temps entre les enregistrements doit être de l'ordre de la période de variation de celle-ci, soit une dizaine d'heures.

Les mesures de la température sont obtenues par le système d'acquisition en enregistrant une mesure chaque demi-heure. Les variations de la température sont bien représentées par cette mesure car la période de variation de la température est largement supérieure à 30 minutes. Ainsi, la variation de la température est décrite avec précision. Cela n'est pas le cas pour la variation du vent (voir § IV-2.).

#### IV-3.3.2. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Dans le tableau 7 sont reportés les résultats des moyennes et des valeurs maximales de la variation de tension des cellules de charge en g/m pour le câble Bersimis, le câble de garde et le faisceau de quatre câbles Bersimis. Ces résultats sont regroupés selon deux classes de variation absolue de la température. La classe 1 regroupe les variations entre 0°C et 10 °C, et la classe 2 entre 10°C et 20°C. Les moyennes de variation de température des classes 1 et 2 sont respectivement de 7,5°C et de 12°C. La moyenne de la variation de température pour tous les enregistrements est de 8°C. Nous ne considérons pas le câble témoin car sa dilatation est bien inférieure à celle des autres câbles.

Tableau 7: Variation expérimentale de la tension en g/m provoquée la dilatation thermique

type de conducteur	Bersimis		garde		faisceau de 4 câbles	
classe	1	2	1	2	1	2
moyenne	19	25	8	13	57	76
maximum	37	37	26	20	110	110

Les valeurs moyennes de la classe 2 sont supérieures à celles de la classe 1 sur tous les câbles. La variation moyenne des tensions est dans le même ordre de croissance que les coefficients de dilatation des câbles Bersimis et de garde. Notons que le nombre d'échantillons de la classe 2 est dix fois moins important que celui de la classe 1.

Pour les moyennes de la classe 1, la théorie estime convenablement les données expérimentales sur le Bersimis et sur le garde. Sur le câble du faisceau, la mauvaise estimation est due à la configuration de ce conducteur que nous n'avons pas considérée dans le modèle théorique. Pour la classe 2, dont la moyenne de température est 12°C, la théorie appliquée à 10°C estime correctement les valeurs moyennes.

Les différences entre la théorie et l'expérimentation concernant les valeurs moyennes sont satisfaisantes compte tenu de la précision et des conditions de mesures. Les effets aérodynamiques que nous n'avons pas pu annuler pendant la période de comparaison des signaux peuvent également être une cause importante de l'erreur du modèle théorique.

Quant aux valeurs expérimentales maximales, elles sont très mal approchées par la théorie. Cette différence est plus importante que dans le cas des efforts aérodynamiques. Elles doivent être manipulées avec précaution car elles sont le résultat d'une mesure unique et dépendent grandement de l'instrumentation.

## **IV-4. LE BRUIT ET LA DÉRIVE ÉLECTRONIQUE**

### **IV-4.1. INTRODUCTION**

Le bruit électronique est une composante du signal qui provient de sources qui perturbent la mesure. Au site expérimental, ces sources sont le câblage, la mise à la terre,

les contacts électroniques et électriques, la dérive électronique de l'instrumentation, le champ électromagnétique créé par la tour d'émission de Télé-Québec, etc...

La dérive électronique est un phénomène dont l'influence se fait sentir sur une longue période de temps. Entre le début (octobre) et la fin (juin) d'une saison, cette dérive est corrigée en effectuant les mises à zéro lors du montage et du démontage de la station. Pendant la phase d'accrétion, la dérive peut être négligeable. Le bruit fait partie de la chaîne de mesure; il est donc présent dans toutes les mesures. Ses caractéristiques mathématiques et physiques varient en fonction de l'état de l'instrumentation et des conditions de fonctionnement. Dans les conditions de mesure du site du Mont Valin, le bruit est non stationnaire; il peut être considéré comme un signal aléatoire de haute fréquence. De plus, nous pouvons émettre l'hypothèse qu'il est la somme d'un très grand nombre de contributions élémentaires indépendantes ayant toutes des importances relatives du même ordre; le bruit sera une fonction aléatoire Gaussienne. Il ne faut pas confondre cette définition avec le bruit Gaussien qui est une fonction aléatoire stationnaire Gaussienne dont les propriétés statistiques sont complètement déterminées.

Dans le cas du Mont Valin, la complexité de la chaîne de mesure et la non stationnarité rendent difficile l'étude statistique du bruit. Nous ne pouvons qu'émettre les conditions générales citées ci-dessus.

Finalement, le bruit n'altère pas le signal mais lui rajoute une composante de haute fréquence. Son intensité varie de façon inconnue et peut nuire à l'interprétation correcte de la variation de tension des cellules de charge. L'effet de cette composante aléatoire est réduit toutefois par l'utilisation de la moyenne d'un grand nombre d'échantillons. Dans la suite, nous tentons de déterminer un ordre de grandeur du bruit dans le signal des cellules de charge en étudiant les données du site.

#### **IV-4.2. CUEILLETTE DES DONNÉES**

Pour pouvoir distinguer la composante du bruit des autres effets (les efforts aérodynamiques et la dilatation thermique, étudiés précédemment) dans le signal des cellules de charge, nous considérons deux enregistrements où les câbles n'ont pas de glace. Pour s'assurer qu'il n'y a pas de glace, nous vérifions que ces deux points sont précédés d'une période de quelques heures de températures positives. Ces deux enregistrements sont aussi choisis de telle sorte que la température et le vent perpendiculaire soient égaux. Ainsi, toute différence dans la tension des cellules de charge pourra être attribuée au bruit.

La méthode d'acquisition des données des cellules de charge a été décrite au chapitre III. Cette procédure fait la moyenne des signaux des cellules de charge sur 30 minutes. En faisant cela, elle atténue l'effet des phénomènes dont les fréquences caractéristiques de variation sont supérieures à  $2\pi/T$ ,  $T$  étant l'intervalle de temps sur lequel se fait la moyenne; ici  $T = 30$  minutes. Puisque le bruit a une fréquence de variation très grande, la moyenne sur 30 minutes ne nous fournira pas une mesure exacte de sa variabilité, mais sera tout de même un indicateur.

L'intervalle de temps entre les deux points doit être petit afin de garder les mêmes conditions météorologiques et le même état de l'instrumentation. Ces variations ne sont pas connues et un petit intervalle de temps permet de les réduire.

#### **IV-4.3. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX**

Dans le tableau 8 sont reportées les valeurs moyennes et maximales des variations de tension des cellules de charge en g/m pour le câble Bersimis, le câble de garde

et le faisceau de quatre câbles Bersimis. Les différents câbles ne sont pas comparables car les conditionneurs de signaux sont parfois changés lorsqu'il y a des problèmes. Les moyennes de la variation de la température et de la vitesse perpendiculaire du vent, entre tous les points de mesure, sont de 0,05°C et 0,31 km/h.

Tableau 8: Variation expérimentale de la tension en g/m provoquée par le bruit électronique

type de conducteur	Bersimis	garde	faisceau de 4 câbles
moyenne	1	2	8
maximum	11	50	200

Nous ne tenons pas compte du câble témoin car il n'est pas inclus dans les résultats théoriques des efforts aérodynamiques et de la dilatation thermique. Il ne fera alors pas partie du seuil final décidé avec tous les effets accumulés.

Les variations du signal dues au bruit électronique peuvent atteindre des valeurs maximales de 50 g/m sur un câble. Par contre, les moyennes, sur un seul câble, ne dépassent pas 2 g/m. Cette propriété démontre bien la grande variabilité du bruit électronique.

## **IV-5. DÉTERMINATION DU SEUIL DE VARIATION**

### **IV-5.1. GÉNÉRALITÉS**

Dans cette partie finale, nous déterminons un seuil que nous appelons le seuil des petites tempêtes. Ce seuil considère les effets, sur les cellules de charge, qui sont provoqués par des phénomènes autres que la glace atmosphérique. Ces phénomènes sont les

efforts aérodynamiques du vent sur les câbles, la dilatation thermique des câbles et les instabilités électroniques et électriques de l'instrumentation.

Lorsque la détection de glace sur les câbles n'est possible que par l'étude du signal des cellules de charge, une erreur peut être commise; c'est le cas des petites accrétions de glace. Ces accrétions sont invisibles aux instruments de détection tels que le givromètre ou la caméra. Le givromètre peut ne pas détecter correctement une accrétion de glace atmosphérique si, par exemple, elle a lieu pendant la période de chauffage ou de refroidissement de l'instrument. Donc, lorsqu'une variation du signal des cellules de charge est enregistrée, nous n'avons aucun moyen certain de décider de la présence de glace. En effet, cette variation peut être expliquée par les effets étudiés ci-dessus. En connaissant un ordre de grandeur des variations du signal engendrées par ceux-ci, nous pouvons décider qu'en dessous de ce seuil toute variation peut être douteuse, c'est-à-dire non expliquée avec certitude par la présence de glace. Ainsi, nous éliminons une partie de la base de données, mais nous augmentons sa validité en ignorant des phénomènes incertains.

#### **IV-5.2. LA COMBINAISON DES EFFETS**

Le seuil des petites tempêtes est déterminé à partir d'une combinaison des effets cités qui tient compte des variations réelles des paramètres sur le site. Cette combinaison est déduite des données du câble Bersimis car c'est celui qui subit le plus les effets de la dilatation thermique et des efforts aérodynamiques. Pour les phénomènes mécaniques sur les câbles, à savoir la dilatation thermique et les efforts aérodynamiques, leurs effets s'ajoutent vectoriellement. Quant à la dérive électronique, bien que sa composante ne soit pas mécanique puisqu'elle provient de la chaîne de mesure, nous pouvons supposer que son



intensité s'ajoute à la somme vectorielle des deux autres. En supposant dans ce cas une somme linéaire pour déterminer le seuil final, nous assurons une valeur fiable.

En étudiant la base de données, nous remarquons fréquemment des variations de 30 km/h (8 m/s) de l'intensité du vent perpendiculaire, dans un intervalle de temps inférieur à 10 heures. Théoriquement, ces valeurs devraient provoquer des variations du signal de la cellule du câble Bersimis de l'ordre de 12 g/m sans glace et de 20 g/m avec 1 kg/m de glace. Expérimentalement, le maximum de variation de la cellule sur ce même câble sans glace est de 20 g/m à une intensité du vent de 30 km/h (8 m/s); rappelons que cette valeur provient d'une acquisition de mesures qui sont des moyennes. Finalement, en comparant les valeurs observées et calculées, la variation seuil de 20 g/m correspondant à 1 kg/m de glace semble raisonnable.

Pour la dilatation thermique, nous remarquons que dans la base de données des variations de 10°C dans un intervalle de temps inférieur à 24 heures sont courantes. Sur le câble Bersimis, les valeurs théoriques et les valeurs expérimentales moyennes concordent à 20 g/m pour cette variation. Mais, les données expérimentales maximales sur tous les conducteurs sont d'environ 30 g/m. En se fiant aux données du site, nous choisissons le seuil de variation du signal de la cellule de charge due à la dilatation thermique égal à 30 g/m.

La dérive électronique dépend de l'instrumentation de chaque cellule de charge et sa variation est aléatoire. Le seuil expérimental maximal sur tous les câbles est de l'ordre de 50 g/m. Compte tenu de ses propriétés, du fait que les conditionneurs de signaux sont plus stables à présent sur le site, et de l'effet réducteur sur la moyenne des 180 échantillons pris sur 30 minutes, un coefficient sécuritaire de 50% est un choix raisonnable. Ainsi, nous fixons un seuil de 25 g/m pour la variation du signal des cellules due à la dérive électronique.

Le seuil final est la somme vectorielle des effets aérodynamiques et de la dilatation thermique, soit une intensité de 36 g/m. À cela il faut ajouter la dérive électronique dont la variation seuil est de 25 g/m. Finalement, le seuil total est de  $36 \text{ g/m} + 25 \text{ g/m} = 61 \text{ g/m}$ . Ce seuil est applicable sur les graphiques pour chaque câble individuel.

## **CHAPITRE V**

### **DÉMARCHE ET OUTILS STATISTIQUES**

Nous faisons d'abord une présentation générale de la démarche statistique utilisée pour étudier la phase d'accrétion. Ensuite, nous énonçons les objectifs et les bases mathématiques des différentes méthodes statistiques utilisées: l'analyse de corrélation, l'analyse en composantes principales et l'analyse de régression. Finalement, nous discutons du choix des variables de prédiction et de la réponse dans l'analyse de régression.

#### **V-1. LA DÉMARCHE STATISTIQUE**

Le but de notre étude est d'analyser et de déterminer les paramètres d'influence de la phase d'accrétion afin de poser des bases pour le développement d'un modèle statistique de givrage des câbles. Notre démarche comprend deux parties: une étude descriptive et une étude explicative.

L'étude descriptive consiste à étudier les caractéristiques statistiques classiques des paramètres choisis pendant la phase d'accrétion. Nous analysons les distributions des facteurs météorologiques, tels que la vitesse du vent perpendiculaire et la température, par type de glace, afin de déterminer les propriétés de la phase d'accrétion qui peuvent être les plus dangereuses. Ensuite, nous considérons la distribution des paramètres propres à l'accrétion par type de câble, tels que la charge de glace et le taux d'accrétion, pour étudier l'effet du conducteur et de l'orientation.

L'étude explicative nous informe sur les facteurs qui expliquent la variation d'une variable principale. Pour notre étude de la phase d'accrétion, la réponse choisie est le taux d'accrétion, soit la quantité de glace accrétée par unité de temps. Nous analysons d'abord les relations entre les facteurs explicatifs par une étude de corrélation et la variance du groupe de variables par une analyse en composantes principales. Enfin, nous effectuons l'analyse de régression pour chaque type de conducteur et pour chaque type de glace. Nous discutons du choix des variables de régression dans la dernière partie de ce chapitre.

## **V-2. ÉTUDE EXPLICATIVE**

### **V-2.1. L'ANALYSE DE CORRÉLATION**

#### **V-2.1.1. OBJECTIFS**

L'analyse de corrélation est un outil statistique simple qui permet d'identifier des liens entre des variables aléatoires. La notion de lien de corrélation exprime la relation entre les sens de variation de deux variables. Lorsque les sens de variation entre deux variables sont égaux ou opposés sur toute une population, elles sont dites corrélées positivement ou négativement selon le cas. Pour mesurer ou quantifier la relation entre deux variables, nous utilisons le coefficient de corrélation linéaire défini dans le paragraphe suivant. Ce coefficient mesure l'intensité de la relation linéaire entre les deux variables observées. Plus il est proche de 1, plus la relation est proche d'une relation linéaire. Si ce coefficient vaut 1, une des deux variables suffit dans l'équation de régression pour représenter la variance qu'exprime l'autre.

### V-2.1.2. DÉFINITION MATHÉMATIQUE

Soit une population de données composées de  $n$  observations de deux variables aléatoires  $x$  et  $y$ , de moyennes respectives  $\bar{x}$  et  $\bar{y}$ . Le coefficient de corrélation linéaire  $r(x, y)$  est le rapport de la covariance entre  $x$  et  $y$  au produit des écart-types de  $x$  et de  $y$ :

$$r(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}).(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

## V-2.2. L'ANALYSE DE RÉGRESSION

### V-2.2.1. OBJECTIFS

L'analyse de régression linéaire multiple étudie la relation entre une variable dépendante et un groupe de variables indépendantes. Nous les appelons respectivement la réponse et les variables de prédiction. Cette méthode peut avoir plusieurs usages, parmi lesquels nous n'en discutons que deux. Un premier usage est l'estimation et la prédiction de la réponse par la combinaison linéaire des variables de prédiction. Toutes les observations doivent être précises afin que la valeur prédite soit sensible aux moindres variations des variables de prédiction. Par contre, dans notre étude sur la phase d'accrétion, nous utilisons l'analyse de régression pour la description des relations; le but est la construction de modèles. L'équation de régression est utilisée comme un outil de description permettant de préciser les relations entre la réponse et les variables de prédiction. En expliquant au mieux la variance de la réponse par une équation de régression, nous choisissons les variables

ayant le plus d'influence sur la réponse. Comme toute étude statistique, la régression ne peut pas justifier un lien de causalité entre la réponse et les variables de prédiction; seule l'analyse physique du phénomène peut le confirmer.

Grâce à une analyse de régression, nous pouvons mieux comprendre l'accrétion de la glace atmosphérique en identifiant les variables avec lesquelles elle apparaît. Cette conclusion nous aide à mieux définir les bases physiques de l'accrétion et nous permet également de douter de l'importance de certains paramètres.

### V-2.2.2. DÉFINITION MATHÉMATIQUE

Soit un ensemble de  $n$  observations de la réponse  $y$  et des  $p$  variables de prédiction  $x_1, x_2, \dots, x_p$ . Nous écrivons que la régression entre la réponse  $y$  et les variables de prédiction  $x_1, x_2, \dots, x_p$  est donnée sous la forme d'un modèle linéaire pour toute observation:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_p x_{pi} + u_i \quad \text{pour } i = 1, 2, \dots, n$$

Les constantes  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$  sont appelées les coefficients de régression partiels du modèle, et  $u_i$  est un terme aléatoire qui représente l'écart entre la vraie relation  $y(x_1, x_2, \dots, x_p)$  et le modèle linéaire ci-dessus.

Pour estimer une relation linéaire entre la réponse et les variables de prédiction, nous utilisons la méthode des moindres carrés qui consiste à rendre minimale la somme des carrés des résidus. Les résidus sont la différence entre l'observation de  $y$  et le modèle linéaire des variables de prédiction: c'est ce que nous avons noté  $u_i$ . Les valeurs des  $\beta$  qui minimisent la somme des résidus sont notées  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_p$ .

Finalement, pour la  $i^{ème}$  observation, la valeur de  $y$  prédite par le modèle de régression linéaire multiple est:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1.x_{1i} + b_2.x_{2i} + \dots + b_p.x_{pi} \quad \text{pour } i = 1, 2, \dots, n$$

Pour pouvoir évaluer la qualité de l'ajustement de la droite de régression par rapport aux points observés, nous utilisons le coefficient de corrélation multiple ou coefficient de détermination  $R^2$ . Il indique la variance de  $y$  expliquée par la combinaison linéaire des variables de régression en comparaison au modèle constant. Le modèle constant est égal à la moyenne des observations de  $y$ , notée  $\bar{y}$ . Ainsi, le coefficient de corrélation multiple est égal au rapport de la variance expliquée par la droite et de la variance totale:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

### V-3. LE CHOIX DES VARIABLES DE RÉGRESSION

Pour étudier la phase d'accrétion par une analyse de régression, il faut d'abord choisir une variable qui représente cette phase. Ensuite, il faut déterminer les variables indépendantes de prédiction qui expliqueront la variance de la réponse.

La réponse doit nous permettre de caractériser les différentes phases d'accrétion afin de les comparer par l'analyse de régression. De plus, puisque nous effectuons une étude par type de glace et par type de conducteur, cette variable doit également être représentative de ces différences. Nous choisissons alors le taux d'accrétion entre le début et la fin de la

phase d'accrétion comme réponse pour notre étude de régression. Le taux d'accrétion considéré est égal au rapport de la charge de glace accumulée et de la durée de la phase.

Comme nous l'avons vu dans la partie I-2, les paramètres qui influencent la phase d'accrétion sont nombreux et difficiles à mesurer. Mais, dans notre cas, le choix des variables de prédiction est limité par les mesures que nous effectuons sur le site. Nous rappelons que les signaux mesurés et enregistrés, présentés à la partie III-2, sont:

- la température de l'air,
- les alarmes du givromètre,
- les précipitations,
- la vitesse du vent,
- la direction du vent,
- la tension mécanique à l'extrémité du câble de diamètre 12,5 mm,
- la tension mécanique à l'extrémité du câble de diamètre 35 mm,
- la tension mécanique à l'extrémité du faisceau de quatre câbles,
- la tension mécanique à l'extrémité du câble de diamètre 7,93 mm.

Les variables de prédiction sont les facteurs d'influence, ou explicatifs, du phénomène d'accrétion, déduits de considérations physiques. Elles sont présentées ci-dessous dans un ordre quelconque et sont toutes considérées pendant la phase d'accrétion:

- la température moyenne de l'air: comme nous avons vu à la partie I-2 concernant la physique de l'accrétion, cette variable a une influence importante sur le type de glace accrétée, et donc, sur le taux d'accrétion,



- l'intensité moyenne du vent orthogonal à la ligne expérimentale: ce paramètre détermine le débit de l'écoulement d'air et de gouttelettes surfondues autour de la ligne expérimentale, et donc la quantité de gouttelettes percutant celle-ci. L'intensité du vent peut également influencer le temps de congélation des gouttelettes surfondues captées par l'obstacle,

- le nombre d'alarmes du givromètre: il indique les alarmes provoquées par l'accumulation de givre sur l'instrument, mais peut aussi indiquer la présence de verglas. La configuration géométrique de l'instrument le rend plus fiable à la détection du givre que du verglas. En le comparant au niveau équivalent de précipitations d'eau et à la température, nous pouvons avoir une bonne idée sur la nature de la glace accumulée. Il faut bien analyser la mesure donnée par cet appareil qui est un détecteur et non un appareil de mesure de la glace atmosphérique,

- le niveau équivalent de précipitations en millimètres d'eau: il permet de distinguer le type de précipitations, horizontales ou verticales. Le verglas s'accumule plutôt verticalement sous forme de pluie verglaçante alors que le givre plutôt horizontalement, transporté par les nuages givrants. Le niveau de précipitations sera plus élevé dans le premier cas que dans le second.

La direction du vent pendant la phase d'accrétion est étroitement liée à la température et au type de glace formée, par les modèles météorologiques régionaux. Les vents d'Est remontent le Fjord du Saguenay depuis le fleuve Saint-Laurent en amenant l'humidité et la douceur océaniques. Les vents d'Ouest proviennent de la Baie James, ils

amènent le froid sec arctique. Néanmoins, ce paramètre n'a pas été inclus dans nos variables de prédiction car sa grande variabilité rend parfois impossible sa représentation par une seule valeur numérique ou qualitative.

La durée de la phase d'accrétion est également une variable intéressante à considérer dans la régression. Contrairement au cas du délestage (Bernardin, S., 1989), ce paramètre est un facteur d'influence du taux d'accrétion moyen et non un effet de celui-ci. Ce paramètre est statistiquement lié au type de glace accumulée, et donc au taux d'accrétion. Pour cette raison, nous ne considérons pas ce paramètre dans l'analyse de régression.

## **CHAPITRE VI**

### **PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS**

Dans cette partie finale, nous présentons et analysons les résultats de l'étude de la phase d'accrétion sur les conducteurs du site expérimental de givrage du Mont Valin. Nous étudions les distributions des facteurs météorologiques pendant la phase d'accrétion et du taux d'accrétion par type de glace et par type de conducteur. Ensuite, nous considérons la charge accrétée et le taux d'accrétion en fonction de la durée de la phase d'accrétion. Finalement, nous développons le modèle de régression du taux d'accrétion par type de glace.

#### **VI-1. INTRODUCTION**

Nous considérons les données pour les saisons 1986-1987 à 1997-1998 incluses. Pendant les saisons 1986-1987 à 1990-1991, la stabilité des signaux des cellules de charge était variable. Aussi, pour ces saisons, la sélection des accrétions a été effectuée avec un critère très exigeant de stabilité du signal. Une étude préliminaire a montré que les résultats obtenus en incluant les accrétions non sélectionnées par ce critère étaient en accord avec l'étude présente qui ne les incluait pas. Ainsi, pour minimiser l'incertitude due à l'instabilité des signaux, nous avons décidé de ne pas inclure ces données dans notre étude.

En utilisant le critère de fin de phase d'accrétion énoncé à la partie II-3, nous définissons cette phase pour tous les événements de la période citée (Tableaux 56 à 59, Annexe A). Ensuite, la base de données des phases d'accrétion est intégrée dans les fichiers définis au Tableau 60 (en Annexe B) de manière à être exploitée pour l'analyse statistique.

Pendant les accrétions de givre débutant le 91/11/15 à 18:00, le 92/12/20 à 00:00 et le 98/3/10 à 17:30, les hauteurs des précipitations enregistrées sont respectivement de 6,75 mm, de 5,25 mm et de 4,75 mm. Ces valeurs élevées dans le cas du givre sont attribuées à une accrétion de glace, en début de phase, composée en grande partie de verglas. Les durées dans ces trois cas représentent respectivement 7 %, 20 % et 6 % des durées totales d'accrétion; quant aux charges de verglas, elles représentent respectivement 12 %, 20 % et 12 % des charges totales de glace en fin d'accrétion. Compte tenu de ces proportions, nous avons classifié ces accrétions dans la catégorie "givre".

D'autre part, les hauteurs des précipitations pendant les accrétions de verglas débutant aux dates suivantes: le 94/10/25 à 21:00, le 95/10/29 à 08:00, le 97/5/10 à 18:30, le 97/10/21 à 02:30 et le 98/4/18 à 11:30, sont nulles ou presque. Cette classification est motivée par les raisons suivantes: les températures moyennes lors de ces accrétions sont comprises entre 0°C et -2°C (valeurs typiques dans le cas du verglas), la phase de maintien est inexistante, les taux d'accrétion et de délestage sont élevés et, finalement, ces accrétions ont lieu pendant les mois de fortes précipitations (en début et en fin de saison). Par conséquent, il est possible que le pluviomètre ait été défectueux ou bloqué.

Les conditions de mesure varient de façon importante entre les saisons à cause de modifications indispensables apportées au site chaque année: remplacements de conditionneurs de signaux, changements de cellules de charge, ajouts ou remplacements d'instruments de mesure, etc,... Pour pouvoir effectuer des comparaisons valides, il faut prendre en considération ces changements.

Le critère principal de classification de notre étude est le type de glace. Ce critère est essentiel pour les propriétés thermodynamiques des gouttelettes d'eau surfondue, et donc, pour le taux d'accrétion. En règle générale, et en tenant compte des variantes de chaque type de glace, le taux d'accrétion d'un événement de verglas est souvent supérieur à celui d'un événement de givre.

La deuxième classification, qui va de soi, est le type de conducteur. Le taux d'accrétion dépend des propriétés mécaniques des conducteurs, et, en particulier, de la rigidité en torsion, qui est reliée au diamètre du conducteur. L'influence de ce paramètre dépend également du type de glace accrétée.

Le taux d'accrétion est aussi relié à l'orientation de la ligne. Ce lien relève de la direction du vent et de la forme sous laquelle apparaissent les types de glace: le givre est produit par des nuages givrants au niveau du sol, alors que le verglas est une précipitation. Pour le givre, la direction du vent altère la surface apparente du conducteur de façon importante car le déplacement des gouttelettes est pratiquement horizontal. Dans le cas du verglas, cette surface ne varie pas avec la direction du vent parce que les gouttelettes tombent sur le conducteur verticalement avec une légère incidence. Cette caractéristique est étudiée en comparant la ligne principale et la ligne témoin.

Nous étudions les quatre types de glace suivants: le givre, le verglas, la neige mouillée et les mélanges. Cette dernière catégorie considère les accrétions qui ne sont pas clairement du givre, du verglas ou de la neige mouillée, mais qui sont composées de proportions proches de la moitié de deux types de glace.

## **VI-2. PLAN DE L'ÉTUDE**

La présentation et l'analyse des résultats se déroule selon le plan suivant avec quelques petites variantes pour la neige mouillée et les mélanges.

### **VI-2.1. ÉTUDE DES DISTRIBUTIONS**

Les distributions des paramètres sont étudiées par le calcul des propriétés statistiques classiques et le tracé des histogrammes de fréquence. Cela a été effectué avec les fonctions "Statistics-Basics-Descriptive" et "Graphics-Histogram" du logiciel statistique commercial Winstat. Les paramètres suivants sont étudiés:

- la température moyenne de l'air,
- la vitesse du vent perpendiculaire à la ligne principale,
- la charge de glace atteinte à la fin de la phase d'accrétion,
- la durée de la phase d'accrétion,
- le taux d'accrétion.

Pour les quatre premiers paramètres, une analyse cherchant à déterminer leur influence sur le taux d'accrétion est également effectuée. Pour cela, nous avons tracé le taux d'accrétion en fonction de ces paramètres par la fonction "Graphics-Scatterplot" de Winstat.

L'étude de la distribution de ces paramètres pendant la phase d'accrétion est importante pour les études de conception et de fiabilité des lignes de transport d'énergie. Mais, elle est également intéressante pour l'analyse de régression car elle peut informer sur les éventuels changements de variables nécessaires pour rendre l'équation de régression linéaire.

La température moyenne de l'air pendant la phase d'accrétion est utile pour déterminer le type de glace accrété mais également pour étudier l'évolution de ces gouttelettes une fois le type de glace déterminée. Sa distribution est intéressante parce qu'elle indique l'intervalle de variation pour un type de glace donné.

La vitesse du vent perpendiculaire à la ligne principale, pendant la phase d'accrétion, détermine les trajectoires des gouttelettes autour du conducteur et les forces d'impact des gouttelettes sur le conducteur. Par son influence sur le taux d'accrétion, sa distribution est importante pour l'étude de la phase d'accrétion. Sa répartition est également significative pour la conception des lignes car les efforts aérodynamiques produits par le vent, combinés à la charge de glace, peuvent générer des charges dynamiques dangereuses.

La charge de glace est la donnée la plus importante pour l'étude d'un site de givrage. Sa distribution est indispensable à toute étude de fiabilité et à tous les modèles numériques ou statistiques. Cette information permet de prévoir les charges probables pour chaque câble et de concevoir les lignes en conséquence.

L'étude de la durée de la phase d'accrétion permet de caractériser, et donc de prévoir, le temps pendant lequel la charge de glace augmente sur le câble. Cette donnée est intéressante pour les études de fiabilité des lignes de transport électriques parce qu'elle permet la prédiction de la durée pendant laquelle les conditions météorologiques peuvent être difficiles sur le site.

Le taux d'accrétion de la phase d'accrétion est la variable principale étudiée en analyse de régression. Sa distribution est une information importante pour mesurer le danger du type de glace considéré.

## **VI-2.2. LA RELATION ENTRE LA CHARGE ET LE TAUX D'ACCRÉTION AVEC LA DURÉE DE LA PHASE D'ACCRÉTION**

La durée de la phase d'accrétion est un paramètre qui est fortement relié au type de glace accrété et aux phénomènes qui le produisent. Les précipitations sont des phénomènes météorologiques courts qui sont créées par des instabilités thermodynamiques dans les nuages en altitude. Les types de glace dangereux produits au niveau du sol sont le verglas et la neige mouillée. Les nuages givrants sont des masses d'air humide qui se déplacent au niveau du sol; aucune précipitation externe au nuage n'est impliquée et le phénomène peut durer plusieurs jours. Le type de glace formé est essentiellement du givre.

À cause de cette relation avec le type de glace, la durée de la phase d'accrétion est un paramètre important à considérer. Le lien de la charge de glace et du taux d'accrétion avec la durée de l'accrétion est un lien complexe duquel nous pouvons tirer des tendances statistiques.

Cette étude est développée par des tracés du taux d'accrétion en fonction de la durée et de la charge de glace par la fonction "Graphics-Scatterplot" du logiciel Winstat.

## **VI-2.3. LE MODÈLE DE RÉGRESSION DU TAUX D'ACCRÉTION**

L'étude de la phase d'accrétion se termine par une analyse de régression sur le taux d'accrétion moyen pendant cette phase. La fonction "Statistics-Regression-Multiple" de Winstat est utilisée. En développant une équation de régression linéaire qui représente au mieux la variance du taux d'accrétion, nous déterminerons le rôle des différents paramètres dans l'explication de cette variable principale. Les influences des paramètres indiqueront les



concepts physiques importants dans l'accrétion en fonction du type de glace et du type de conducteur.

### **VI-3. LE GIVRE**

#### **VI-3.1. ÉTUDE DES DISTRIBUTIONS**

##### **VI-3.1.1. LA TEMPÉRATURE**

Nous présentons à la figure 15 la distribution de la température sous forme d'un histogramme de fréquence pour un seul câble (le câble de garde) car le type de conducteur n'a pas d'influence directe sur la distribution de la température. Nous avons choisi le câble sur lequel la variation de la température est la plus importante: les valeurs maximales et minimales atteintes sont respectivement de  $-1,1^{\circ}\text{C}$  et de  $-25,6^{\circ}\text{C}$ . La largeur de chaque classe est de  $2^{\circ}\text{C}$ . La classe dont la fréquence est maximale (15 réalisations) est celle qui comprend les températures entre  $-5,7^{\circ}\text{C}$  et  $-7,7^{\circ}\text{C}$ . Ensuite viennent les classes qui comprennent les températures entre  $-7,7^{\circ}\text{C}$  et  $-9,7^{\circ}\text{C}$  (11 réalisations), et, entre  $-3,7^{\circ}\text{C}$  et  $-1,7^{\circ}\text{C}$  (10 réalisations). Nous avons également tracé la loi normale de moyenne  $-6,8^{\circ}\text{C}$  et d'écart-type  $4,6^{\circ}\text{C}$ ; cette approximation de la distribution de la température est satisfaisante.

Dans le tableau 9, nous avons reporté la moyenne et l'écart-type de la température moyenne enregistrée pendant la phase d'accrétion, les valeurs maximales et minimales avec les taux d'accrétion correspondants, pour les quatre types de câbles. Sur le câble de garde, la température est plus variable que sur les autres câbles: la moyenne est la plus basse ( $-6,8^{\circ}\text{C}$ ), l'écart-type est le plus grand ( $4,6^{\circ}\text{C}$ ) et les valeurs minimales et maximales sont les extrêmes de tous les câbles (respectivement  $-25,6^{\circ}\text{C}$  et  $-1,1^{\circ}\text{C}$ ). Nous remarquons également que les taux d'accrétion aux températures maximales sont clairement supérieurs à ceux aux températures minimales sur tous les câbles.

Cette dernière remarque est approfondie par les graphes de la figure 16 où nous représentons les relations entre la température et le taux d'accrétion. Dans le cas du câble de garde, la corrélation positive entre ces deux variables peut se vérifier visuellement; plus la température est proche de  $0^{\circ}\text{C}$ , plus le taux d'accrétion est élevé: la relation est de forme parabolique. Par contre, pour tous les autres câbles, cette tendance n'est pas confirmée: le nuage de points ne forme pas de courbe claire. Néanmoins, toutes les tempêtes dont les taux d'accrétion sont supérieurs à  $20\text{ g/m.h}$  sur le câble de garde, à  $10\text{ g/m.h}$  sur les câbles Bersimis et du faisceau, et à  $5\text{ g/m.h}$  sur le câble témoin, ont une température moyenne pendant la phase d'accrétion supérieure à  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Ainsi, dans le cas du givre, l'influence de la température de l'air pendant la phase d'accrétion sur le taux d'accrétion est difficile à observer. Considérons la physique de l'accrétion du givre sur les conducteurs. Les gouttelettes d'eau surfondue dans les nuages givrants sont à des températures nettement négatives. Pour faire changer leur état thermodynamique, et donc influencer l'accrétion, il faut un échange important de chaleur avec le milieu ambiant. La rapidité du passage des nuages givrants limite cette réaction.

Tableau 9: Caractéristiques de la température en °C dans le cas du givre

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	51	52	44	45
Moyenne	-6,8	-6,5	-6,2	-6,2
écart-type	4,6	3,5	3,3	3,5
valeur maximale	-1,1	-1,1	-1,1	-1,1
taux d'accrétion correspondant (en g/m.h)	11	20	22	13
valeur minimale	-25,6	-16,9	-16,9	-16,9
taux d'accrétion correspondant (en g/m.h)	4	9	6	5

### VI-3.1.2. LE VENT

Dans la figure 17 sont représentées, sous forme d'histogrammes de fréquence, les distributions de la vitesse du vent perpendiculaire dans le cas du givre pour les quatre types de conducteurs. La largeur de chaque classe est de 5 km/h. Sur ces figures sont superposées les fonctions de densité de probabilité des lois normales correspondant à chaque câble. Cette approximation est tout à fait convenable sur tous les conducteurs. Les classes dont les réalisations sont les moins fréquentes sont celles aux extrêmes, c'est-à-dire inférieures à 9 km/h et supérieures à 24 km/h. Les classes entre 9 km/h et 24 km/h sont les plus fréquentes; elles représentent entre 60 % et 70 % des observations. L'allure des histogrammes se reproduit pour chaque câble mais à différentes intensités de fréquence.

Cela n'implique pas que les événements sont identiques sur tous les câbles car nous observons dans la base de données qu'ils sont bien différents entre les câbles, et notamment entre les deux lignes.

Dans le tableau 10 sont présentées les valeurs moyennes, l'écart-type, et les valeurs minimales et maximales avec les taux d'accrétion correspondants, relatifs à la vitesse perpendiculaire moyenne du vent pendant la phase d'accrétion pour les quatre types de câbles. Les valeurs minimales pour la moyenne, l'écart-type et l'intensité maximale sont atteintes sur le câble témoin. Ce regroupement de la distribution du vent pour ce câble n'est pas dû à un nombre inférieur d'observations.

Les taux d'accrétion correspondant aux vitesses maximales sont légèrement supérieurs aux taux correspondant aux vitesses minimales pour les câbles Bersimis et témoin. Pour le câble de garde, ils sont égaux, et pour le câble du faisceau, le premier est inférieur au second. Ces données traduisent bien la complexité de la relation entre l'intensité du vent perpendiculaire et le taux d'accrétion telle que représentée à la figure 18. Nous ne pouvons distinguer aucune tendance dans ces graphiques, seulement une structure en étoile centrée à l'origine. Sur le câble témoin, nous remarquons bien que les taux d'accrétion sont plus faibles et que l'influence du vent est semblable aux cas des autres câbles. La valeur de 30 g/m.h du taux d'accrétion à une intensité perpendiculaire du vent de 23 km/h est élevée. Cette phase d'accrétion de givre, datée du 3 janvier 1998 (à la même époque que la tempête de verglas à Montréal), a été observée uniquement sur ce câble car les autres étaient déjà chargés.

Tableau 10: Caractéristiques de la vitesse du vent perpendiculaire en km/h dans le cas du givre

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	51	52	44	45
moyenne	17,9	17,5	16,7	16,4
écart-type	8,4	8,1	7,5	6,8
valeur maximale	37,2	37,2	35,7	34,3
taux d'accrétion correspondant (en g/m.h)	15	17	4	10
valeur minimale	4,5	4,5	4,5	4,5
taux d'accrétion correspondant (en g/m.h)	15	12	9	8

L'influence et le rôle du vent dans le phénomène d'accrétion du givre n'est pas simple. D'une part, il favorise l'accrétion des gouttelettes car il augmente leur débit, et ainsi le nombre de gouttelettes qui percutent le conducteur. D'autre part, les forces aérodynamiques balayent facilement les dépôts de givre dont la densité est faible. De plus, les gouttelettes ayant de faibles inerties, le vent peut dévier leurs trajectoires et les faire contourner les conducteurs.

### VI-3.1.3. LA CHARGE DE GLACE

À la figure 19, nous présentons les histogrammes de fréquence de la charge de glace en fin de phase d'accrétion. Cette valeur n'est pas forcément la valeur maximale atteinte pendant l'événement qui peut se produire pendant la phase de maintien (Gouzy, S., 2000). Chaque classe a une largeur de 0,2 kg/m pour tous les câbles. Sur tous les câbles, l'approximation de la distribution de fréquence par la densité de la loi lognormale semble être appropriée. La classe dont la fréquence est la plus élevée est la première classe qui comprend les charges inférieures à 0,2 kg/m; elle représente entre 52 % et 70 % des observations sur tous les conducteurs.

Dans le tableau 11 sont inscrits la valeur moyenne, l'écart-type et la valeur maximale de la charge pour tous les types de conducteur.

Tableau 11: Caractéristiques de la charge de glace en fin de phase d'accrétion en kg/m dans le cas du givre

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	51	52	44	45
moyenne	0,46	0,32	0,31	0,21
écart-type	0,52	0,38	0,32	0,22
valeur maximale	2,08	1,62	1,21	0,84

Dans l'ordre décroissant, la charge moyenne d'accrétion de givre se fait sur le câble de garde, le câble Bersimis, le câble du faisceau et le câble témoin. La valeur

moyenne sur le câble témoin est proche de celle des autres câbles: leur rapport varie entre 1,5 et 2. Tous les écarts-types dépassent le seuil de 100 % et montrent la grande variabilité de la charge.

La charge maximale est atteinte sur le câble de garde (2,08 kg/m). Ensuite, sont classés dans l'ordre décroissant, le câble Bersimis (1,62 kg/m), le câble du faisceau (1,21 kg/m) et le câble témoin (0,84 kg/m). De nouveau, la valeur sur le câble témoin est assez proche de celle des autres câbles, notamment du câble du faisceau.

#### **VI-3.1.4. LA DURÉE DE LA PHASE D'ACCRÉTION**

Nous présentons, à la figure 20, les distributions de la durée de la phase d'accrétion sur tous les conducteurs sous forme d'histogrammes de fréquence. La largeur de chaque classe est de 20 heures. La première classe est la plus fréquente; elle représente entre 40 % et 55 % des données. Une loi lognormale semble être une bonne approximation du comportement de ces distributions.

Dans le tableau 12, nous présentons quelques propriétés statistiques de la durée de la phase d'accrétion: la moyenne, l'écart-type, les valeurs minimales et maximales.

Nous remarquons d'abord que la durée moyenne de la phase d'accrétion d'un événement de givre est plus grande sur le câble témoin (40 heures) que sur les autres câbles. Cette caractéristique est due à l'orientation du câble: il n'est pas exposé perpendiculairement aux vents dominants. Ensuite, dans l'ordre décroissant de la durée moyenne, nous observons le câble du faisceau (38 heures), le câble Bersimis (31 heures) et le câble de garde (31 heures). Les écarts-types sont importants sur tous les câbles, démontrant que le givre est un phénomène dont la durée est très variable. Les durées minimales et maximales sont

semblables sur tous les conducteurs; elles sont respectivement d'environ 5 heures et de 150,5 heures.

Tableau 12: Caractéristiques de la durée de la phase d'accrétion en heures dans le cas du givre

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	51	52	44	45
moyenne	31	31	38	40
écart-type	31	32	36	35
valeur minimale	4,5	6	5	6
valeur maximale	150,5	150,5	150,5	150,5

### VI-3.1.5. LE TAUX D'ACCRÉTION

Les distributions du taux d'accrétion sur tous les conducteurs sont présentées à la figure 21. La largeur des classes est de 4 g/m.h sur tous les câbles. L'approximation de ces distributions par des lois normales est illustrée sur les figures. Sur les conducteurs de la ligne principale (figures 21.a, b, c), cette approche est bonne; la fréquence maximale se trouve dans la classe de la valeur moyenne de l'échantillon pour le câble du faisceau et dans la classe précédente pour les deux autres conducteurs. La distribution est différente dans le cas du câble témoin; elle n'est plus bien approchée par la loi normale. En effet, la classe de fréquence maximale est la première classe, qui comprend les taux d'accrétion inférieurs à 4,71 g/m.h, avec 50 % de toutes les réalisations. Dans ce cas, une loi lognormale fournit une



approximation plus valable. Cette différence peut être attribuée à l'orientation du câble et non à son diamètre car les câbles de la ligne principale ont le même type de distribution. Ainsi, l'orientation est importante lors de l'étude du taux d'accrétion du givre.

Dans le tableau 13, nous présentons les caractéristiques principales de la distribution du taux d'accrétion sur les quatre types de conducteurs: la moyenne, l'écart-type et la valeur maximale. La moyenne est plus importante, dans l'ordre décroissant, sur le câble de garde (14,3 g/m.h), le câble Bersimis (10,6 g/m.h), le câble du faisceau (8,8 g/m.h) et le câble témoin (6,2 g/m.h). La moyenne du taux d'accrétion sur les conducteurs de la ligne principale est supérieure à celle de la ligne témoin (en particulier pour les conducteurs seuls: le câble de garde et le câble Bersimis) parce que leur orientation est perpendiculaire à la direction des vents dominants.

Les coefficients de variation ont de 95 % dans le cas du câble témoin, et d'environ 60 % pour les autres câbles. Le taux d'accrétion du givre varie énormément sur le câble témoin. Cette remarque est confirmée par la valeur maximale du taux d'accrétion qui est observée sur le câble de garde (38,1 g/m.h), suivi du câble témoin (30,8 g/m.h), du câble Bersimis (26,4 g/m.h) et du câble du faisceau (24,2 g/m.h). Le taux d'accrétion maximal du câble témoin est très proche de la valeur maximale atteinte par le câble de garde.

Tableau 13: Caractéristiques des taux d'accrétion en g/m.h dans le cas du givre

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	51	52	44	45
moyenne	14,3	10,6	8,8	6,2
écart-type	9,2	6,4	5,4	5,9
valeur maximale	38,1	26,4	24,2	30,8

### VI-3.2. LA CHARGE ET LE TAUX D'ACCRÉTION EN FONCTION DE LA DURÉE DE LA PHASE D'ACCRÉTION

À la figure 22, nous présentons les relations entre la durée de la phase d'accrétion et la charge de glace en fin de phase d'accrétion pour les quatre types de conducteurs dans le cas du givre. Toutes les courbes ont une tendance positive croissante: les charges supérieures ont tendance à être atteintes pour des durées plus longues de la phase d'accrétion. Nous remarquons que les points sont très regroupés près de l'origine, et, en forme d'éventail ailleurs. Ainsi, les charges maximales ne correspondent pas aux durées maximales. Ces charges maximales sont tout de même accumulées après des durées largement supérieures à la moyenne (de l'ordre de quelques dizaines d'heures).

Les relations entre la durée de la phase d'accrétion et le taux d'accrétion sont présentées à la figure 23 pour tous les types de conducteurs. De façon générale, nous observons une corrélation non-linéaire négative entre ces deux variables. Cette tendance est plus claire sur les câbles Bersimis, faisceau et témoin que sur le câble de garde. Les taux d'accrétion élevés (supérieurs à 20 g/m.h sur le câble de garde, à 15 g/m.h sur le câble

Bersimis, à 10 g/m.h sur le câble du faisceau et le câble témoin) apparaissent toujours sur des durées inférieures à 60 heures, alors que les durées pour les taux d'accrétion faibles varient entre 10 heures et 150 heures.

### **VI-3.3. LE MODÈLE DE RÉGRESSION DU TAUX D'ACCRÉTION**

L'analyse de régression est notre outil principal pour déterminer comment les différents facteurs influencent le taux d'accrétion pour chaque type de câble. Nous avons d'abord développé un modèle de régression linéaire à partir des variables de régression définies à la partie V-3. Le nombre d'alarmes du givromètre et la hauteur des précipitations d'eau n'expliquaient pas de façon satisfaisante la variance du taux d'accrétion. Ces deux facteurs étant directement liés à la durée de la phase d'accrétion, ils ne pouvaient pas être utilisés pour représenter la variabilité du taux d'accrétion. En effet, nous pouvons observer le même taux d'accrétion pour deux valeurs différentes de ces deux paramètres parce qu'ils dépendent de la durée de l'accrétion. Pour tenir compte de ces facteurs correctement, il a fallu considérer leur variation par unité de temps. Nous les avons alors remplacés dans l'analyse de régression par le taux d'alarmes et le taux des précipitations par unité de temps.

Les variables que nous utilisons pour l'analyse de régression sont notées:

$Y$ : le taux d'accrétion de la phase d'accrétion.

$X_1$ : la vitesse moyenne du vent perpendiculaire pendant la phase d'accrétion.

$X_2$ : la température moyenne de l'air pendant la phase d'accrétion.

$X_3$ : le taux d'alarmes du givromètre pendant la phase d'accrétion.

$X_4$ : le taux des précipitations en millimètres d'eau pendant la phase d'accrétion.

Cette notation sera également utilisée dans le cas des autres types de glace.

Aux tableaux 14 à 17, nous reportons les coefficients de corrélation (voir V-2.1.2.) entre les variables de régression et le taux d'accrétion pour les quatre types de conducteurs. Il ne faut pas oublier, tel que défini au chapitre précédent, que ces coefficients ne quantifient que la relation linéaire entre les deux variables.

Tableau 14: Coefficients de corrélation dans le cas du givre sur le câble de garde

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	taux d'accrétion
$X_1$	1	-0,02	0,26	0,11	0,27
$X_2$	-0,02	1	0,3	-0,02	0,14
$X_3$	0,26	0,3	1	0,06	0,86
$X_4$	0,11	-0,02	0,06	1	0,1
taux d'accrétion	0,27	0,14	0,86	0,1	1

Tableau 15: Coefficients de corrélation dans le cas du givre sur le câble Bersimis

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	taux d'accrétion
$X_1$	1	0,04	0,27	0,15	0,2
$X_2$	0,04	1	0,27	0,04	0,14
$X_3$	0,27	0,27	1	0,08	0,64
$X_4$	0,15	0,04	0,08	1	0,003
taux d'accrétion	0,2	0,14	0,64	0,003	1

Tableau 16: Coefficients de corrélation dans le cas du givre sur un câble du faisceau

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	taux d'accrétion
$X_1$	1	0,28	0,37	0,12	0,06
$X_2$	0,28	1	0,28	0,06	0,04
$X_3$	0,37	0,28	1	0,04	0,63
$X_4$	0,12	0,06	0,04	1	0,05
taux d'accrétion	0,06	0,04	0,63	0,05	1

Tableau 17: Coefficients de corrélation dans le cas du givre sur le câble témoin

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	taux d'accrétion
$X_1$	1	0,08	0,4	0,18	0,14
$X_2$	0,08	1	0,34	0,06	0,16
$X_3$	0,4	0,34	1	0,1	0,6
$X_4$	0,18	0,06	0,1	1	-0,06
taux d'accrétion	0,14	0,16	0,6	-0,06	1

Sur tous les conducteurs, les coefficients de corrélation les plus forts (entre les variables explicatives) sont entre le taux d'alarmes du givromètre ( $X_3$ ), et la vitesse moyenne du vent ( $X_1$ ) et la température moyenne de l'air ( $X_2$ ). Leurs valeurs varient entre

0,26 et 0,34. Ainsi, les variances des deux facteurs  $X_1$  et  $X_2$  sont en partie représentées par le seul facteur  $X_3$ . La vitesse du vent est reliée au taux d'alarmes du givromètre par le débit des gouttelettes qui percutent la sonde. Plus la vitesse du vent est élevée, plus le nombre de gouttelettes frappant le givromètre est grand, et donc plus nombreuses sont les gouttelettes accrétant sur la sonde. La relation croissante entre le taux d'alarmes et la température de l'air est expliquée par la tendance des gouttelettes à adhérer mieux lorsque leurs températures croissent.

Le taux d'alarmes du givromètre ( $X_3$ ) a le coefficient de corrélation avec le taux d'accrétion le plus important sur tous les câbles. Sa valeur varie de 0,86 dans le cas du câble de garde à 0,60 dans le cas du câble témoin. Physiquement, la surface de la sonde du givromètre apparente aux gouttelettes est importante à cause de leur déplacement horizontal dans les nuages givrants. Les signaux du givromètre sont ainsi un bon indicateur de l'accrétion des gouttelettes dans le cas du givre.

Quant au taux des précipitations ( $X_4$ ), son coefficient de corrélation avec le taux d'accrétion est négligeable sur tous les types de câbles. En effet, le principe de fonctionnement du pluviomètre lui permet de capter essentiellement des précipitations. Ainsi, les nuages givrants ayant un déplacement horizontal ne seront pas détectés par cet instrument.

Les résultats de l'analyse de régression effectuée avec le logiciel Winstat sont présentés aux tableaux 18 à 21. Dans ces tableaux, nous avons reportés les coefficients de corrélation multiple et les variables explicatives correspondantes pour tous les câbles. En se basant sur les coefficients de corrélation multiple (générés avec toutes les variables explicatives) dans l'ordre décroissant, nous observons: le câble de garde (74,12 %), le câble Bersimis (50,2 %), le câble du faisceau (39,4 %) et le câble témoin (34,95 %).

L'approximation de la variation du taux d'accrétion par l'équation linéaire de régression est meilleure sur le câble de garde que dans les autres cas.

Tableau 18: Résultats de l'analyse de régression dans le cas du givre sur le câble de garde

nombre de variables	Variables	R <sup>2</sup> en %
1	$X_3$	72,05
2	$X_3, X_2$	73,42
3	$X_3, X_2, X_4$	73,96
4	$X_3, X_2, X_4, X_1$	74,12

Tableau 19: Résultats de l'analyse de régression dans le cas du givre sur le câble Bersimis

Nombre de variables	Variables	R <sup>2</sup> en %
1	$X_3$	45,04
2	$X_3, X_2$	49,81
3	$X_3, X_2, X_4$	50,14
4	$X_3, X_2, X_4, X_1$	50,2

Tableau 20: Résultats de l'analyse de régression dans le cas du givre sur un câble du faisceau

nombre de variables	Variables	R <sup>2</sup> en %
1	$X_3$	36,04
2	$X_3, X_1$	38,99
3	$X_3, X_1, X_2$	39,23
4	$X_3, X_1, X_2, X_4$	39,4

Tableau 21: Résultats de l'analyse de régression dans le cas du givre sur le câble témoin

nombre de variables	Variables	R <sup>2</sup> en %
1	$X_3$	32,75
2	$X_3, X_4$	34,46
3	$X_3, X_4, X_1$	34,87
4	$X_3, X_4, X_1, X_2$	34,95

Dans tous les cas, le taux d'alarmes ( $X_3$ ) explique la plus grande part de variation du taux d'accrétion. Cette variable est essentielle à la prédiction du taux d'accrétion dans le cas du givre. Le taux d'accrétion est sensible à la variation du taux d'alarmes enregistrées par le givromètre pendant la phase d'accrétion du givre. Pour les câbles de garde et Bersimis, les variables qui expliquent le plus la variation du taux d'accrétion sont dans l'ordre décroissant le taux d'alarmes ( $X_3$ ), la température moyenne de l'air ( $X_2$ ), le taux des précipitations ( $X_4$ ) et la vitesse moyenne du vent ( $X_1$ ). Dans le cas du



câble du faisceau, cet ordre devient:  $X_3$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ , et  $X_4$ . Et, dans le cas du câble témoin, nous observons:  $X_3$ ,  $X_4$ ,  $X_1$  et  $X_2$ .

Pour le câble du faisceau, la position de la vitesse moyenne du vent  $X_1$  (différente de celle des deux premiers câbles) dans la part de variation du taux d'accrétion s'explique par son coefficient de corrélation linéaire relativement élevé avec la température  $X_2$  (0,28) et avec le facteur le plus significatif de la régression, le taux d'alarmes  $X_3$  (0,37). Ainsi, une part de la variation du taux d'accrétion expliquée par  $X_1$  est commune avec  $X_2$  et avec  $X_3$ .

Dans le cas du câble témoin, les coefficients de corrélation entre les différents facteurs sont du même ordre de grandeur que ceux des câbles de garde et Bersimis. Mais, contrairement à ces deux câbles où elle explique une bonne proportion de la variation du taux d'accrétion (1,37 % et 4,77 %), la température ( $X_2$ ) explique la plus petite proportion (0,08 %). Aucune raison physique ne semble justifier ce comportement. En effet, l'orientation du conducteur n'a pas d'influence sur la relation entre le taux d'accrétion et la température de l'air. La variable  $X_2$  explique peu parce que sa relation avec le taux d'accrétion est mal approchée par l'équation de régression linéaire.

D'après les résultats présentés par les coefficients de corrélation multiple, le facteur  $X_1$ , c'est-à-dire la vitesse du vent perpendiculaire, n'est pas un facteur essentiel de l'explication de la variation du taux d'accrétion dans le cas du givre. Pour ce type de glace atmosphérique, le vent devrait être un élément d'influence important à cause de sa formation par le déplacement des nuages givrants. Néanmoins, le câble témoin présente l'explication du taux d'accrétion la moins complète de tous les câbles avec 34,95 %. Ce manque d'explication peut être lié à la variable  $X_1$  qui n'est pas significative pour le taux d'accrétion du givre sur le câble témoin à cause de son orientation.

Le taux d'alarmes du givromètre est la variable la plus importante à considérer dans l'analyse du taux d'accrétion sur tous les conducteurs: cette conclusion est en accord avec les phénomènes météorologiques qui créent le givre et le fonctionnement du givromètre tels que discutés plus haut. Ensuite, il faut tenir compte de la température de l'air. Ce facteur est important car la plage de températures étudiées dans le cas du givre est très large. L'effet du diamètre du conducteur sur le taux d'accrétion n'est pas montré par cette analyse. Finalement, l'orientation du câble est un paramètre à considérer qui permet de mieux estimer le taux d'accrétion.

## **VI-4. LE VERGLAS**

### **VI-4.1. ÉTUDE DES DISTRIBUTIONS**

#### **VI-4.1.1. LA TEMPÉRATURE**

Le type de conducteur n'a aucune influence directe sur la distribution de la température extérieure. Les tempêtes peuvent varier d'un conducteur à l'autre, et donc la distribution de température aussi. Mais, cette relation n'étant pas une relation de cause à effet, nous ne présentons qu'un seul histogramme de fréquence de la température à la figure 24. Le câble présenté est le câble Bersimis car l'intervalle de variation de température est grand. Les classes ont une largeur de  $0,5^{\circ}\text{C}$  chacune. La densité de probabilité de la loi normale de moyenne  $-1,9^{\circ}\text{C}$  et d'écart-type  $1,4^{\circ}\text{C}$  est également tracée: cette loi représente correctement la distribution de température. Les quatre classes les plus fréquentes sont toutes comprises entre  $-2,8^{\circ}\text{C}$  et  $-0,3^{\circ}\text{C}$ . Les deux valeurs extrêmes, qui n'apparaissent qu'une seule fois, sont  $-0,1^{\circ}\text{C}$  et  $-6,2^{\circ}\text{C}$ .

Dans le tableau 22, nous présentons la moyenne et l'écart-type de la température moyenne enregistrée pendant la phase d'accrétion, les valeurs maximales et minimales avec

les taux d'accrétion correspondants, pour les quatre types de câbles. La température moyenne (environ  $-1,9^{\circ}\text{C}$ ), l'écart-type (environ  $1,2^{\circ}\text{C}$ ), les valeurs maximales et minimales (respectivement de  $-0,1^{\circ}\text{C}$  et  $-4,5^{\circ}\text{C}$  environ) sont semblables sur tous les câbles, sauf pour le câble Bersimis qui atteint une valeur minimale de  $-6,2^{\circ}\text{C}$ .

Tableau 22: Caractéristiques de la température en  $^{\circ}\text{C}$  dans le cas du verglas

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	39	38	36	32
moyenne	-1,9	-1,9	-1,9	-1,9
écart-type	1,2	1,4	1,2	1,2
valeur maximale	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
taux d'accrétion correspondant (en g/m.h)	62	82	67	17
valeur minimale	-4,5	-6,2	-4,5	-4,5
taux d'accrétion correspondant (en g/m.h)	8,1	28	6,9	7,5

Dans ce tableau, nous constatons également une corrélation positive entre le taux d'accrétion et la température. Cette corrélation est confirmée par la figure 25 qui représente cette relation pour les quatre types de câbles. Plus la température moyenne d'une phase d'accrétion est proche de  $0^{\circ}\text{C}$ , plus le taux d'accrétion a tendance à être élevé. Par contre, plus la température est basse, plus le taux d'accrétion est faible. Dans le cas du câble témoin, ce comportement est aussi vrai, mais moins évident, car le taux d'accrétion est

beaucoup plus faible que dans le cas des autres câbles. Lorsque la température extérieure est proche du point de congélation, les gouttelettes d'eau surfondue peuvent ruisseler sous forme liquide autour du conducteur lors de l'accrétion; le taux d'accrétion qui en résulte est élevé. L'intensité du vent est également un facteur qui, relié indirectement à la température par les modèles météorologiques, explique une part de ce comportement.

#### **VI-4.1.2. LE VENT**

Les distributions de la vitesse du vent perpendiculaire à la ligne principale dans le cas du verglas sont présentées à la figure 26 sous forme d'histogrammes de fréquence pour les quatre types de conducteurs. La largeur des classes est de 5 km/h. Les classes les plus fréquentes sont celles entourant la classe qui contient la valeur moyenne et les classes les moins fréquentes sont celles contenant la moyenne et les deux au delà de 38 km/h: la loi de variation observée est bimodale avec une fréquence basse à la valeur moyenne. Nous avons également représenté les lois normales de moyennes 25 km/h et d'écart-types 10 km/h pour tous les câbles sur les figures. L'hypothèse d'une loi normale est bonne sauf pour la classe contenant la valeur moyenne de l'échantillon. De plus, l'allure de cette loi se reproduit sur chaque câble (mais à une différente intensité de fréquence) puisqu'une grande part des événements est semblable pour tous les câbles. Les 32 événements de verglas sur le câble témoin sont observés, à part un ou deux, parmi les 38, 34 ou 35 des autres câbles dont l'orientation est perpendiculaire à ce dernier. Ainsi, l'orientation du conducteur n'a pas une grande influence sur le nombre de tempêtes de verglas observées.

Nous avons reporté au tableau 23 les valeurs moyennes, l'écart-type, les valeurs minimales et maximales avec les taux d'accrétion correspondants, relatifs à la vitesse perpendiculaire moyenne du vent pendant la phase d'accrétion pour les quatre types

de câbles. La valeur moyenne de 25 km/h, l'écart-type de 10 km/h, les valeurs minimales et maximales, respectivement de 8 km/h et 44 km/h, sont très voisins dans les quatre cas.

Tableau 23: Caractéristiques de la vitesse du vent perpendiculaire en km/h dans le cas du verglas

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	38	34	35	32
moyenne	24,6	25,2	24,5	25,5
écart-type	10,2	10,5	10,7	10,4
valeur maximale	44,1	44,1	44,1	44,1
taux d'accrétion correspondant (en g/m.h)	33,2	39,1	39,3	10,4
valeur minimale	8,2	8,2	8,1	8,2
taux d'accrétion correspondant (en g/m.h)	19,8	21,1	20,6	14,9

La valeur du taux d'accrétion correspondant à la vitesse maximale de 44,1 km/h est de l'ordre de 40 g/m.h sur la ligne principale et de 10 g/m.h sur la ligne témoin. Notons qu'à la vitesse de 43 km/h, le taux d'accrétion correspondant sur tous les câbles est multiplié par un facteur 3 ou 4 par rapport à la vitesse 44 km/h. Ainsi, il faut être prudent en interprétant les corrélations à partir de ce tableau qui ne représente que quelques points. Dans la figure 27, nous illustrons la corrélation positive, observée dans le tableau 23, entre le taux d'accrétion et la vitesse du vent perpendiculaire. Le taux d'accrétion a tendance à

croître de façon parabolique avec la vitesse du vent dans le cas des câbles de garde et Bersimis. Cette tendance est moins nette sur un câble du faisceau où nous observons des taux d'accrétion élevés (supérieurs à 80 g/m.h) à de faibles vitesses de vent (inférieures à 20 km/h). Sur le câble témoin, les taux d'accrétion sont plus faibles mais le comportement croissant est vérifié. L'enveloppe conique qui relie le taux d'accrétion à la vitesse du vent montre que ce premier est plus variable aux vitesses élevées.

#### **VI-4.1.3. LA CHARGE DE GLACE**

À la figure 28, nous présentons les histogrammes de fréquence de la charge de glace en fin de phase d'accrétion. Rappelons que cette valeur n'est pas forcément la valeur maximale atteinte pendant l'événement; elle peut se produire pendant la phase de maintien (Gouzy, S., 2000). La largeur des classes est de 0,2 kg/m sur tous les conducteurs de la ligne principale et de 0,1 kg/m sur la ligne témoin. La distribution de la charge correspond convenablement à une loi lognormale car les classes de charges minimales sont les plus fréquentes et celles de charges maximales sont les moins fréquentes.

La valeur moyenne, l'écart-type et la valeur maximale de la charge pour tous les types de conducteurs sont insérés dans le tableau 24 ci-dessous.

La moyenne de la charge est observée, dans l'ordre décroissant, sur le câble de garde, le câble Bersimis, le câble du faisceau et le câble témoin. Le câble témoin est moins chargé en glace en moyenne parce que son orientation est perpendiculaire à la direction dominante est-ouest du vent. Même dans le cas du verglas, qui est une accrétion verticale légèrement inclinée sur le conducteur, la direction du vent et l'orientation du conducteur sont importants pour la charge de glace.

Tableau 24: Caractéristiques de la charge de glace en fin de phase d'accrétion en kg/m dans le cas du verglas

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	39	38	36	32
Moyenne	0,46	0,44	0,38	0,17
écart-type	0,35	0,34	0,32	0,14
valeur maximale	1,75	1,9	1,64	0,6

Dans l'ordre décroissant, la valeur maximale atteinte est sur le câble Bersimis (1,9 kg/m), le câble de garde (1,75 kg/m), le câble du faisceau (1,64 kg/m) et le câble témoin (0,6 kg/m). Ces valeurs ont été observées sur le même événement pour les câbles de la ligne principale.

#### VI-4.1.4. LA DURÉE DE LA PHASE D'ACCRÉTION

Les distributions de la durée de la phase d'accrétion sur tous les conducteurs sont présentées sous forme d'histogrammes de fréquence à la figure 29. La largeur des classes est de 5 heures. Toutes ces distributions suivent approximativement une loi lognormale dont la fréquence la plus élevée se trouve à la deuxième classe, c'est-à dire entre 7,5 heures et 12,5 heures, et les durées supérieures à 22,5 heures sont peu fréquentes.

La distribution de la durée sur le câble témoin est semblable à celle des autres câbles. Ainsi, l'orientation du câble n'a pas d'influence sur la durée de la phase d'accrétion du phénomène de verglas.

Nous confirmons ce commentaire dans le tableau 25 où nous présentons quelques propriétés statistiques de la durée de la phase d'accrétion: la moyenne, l'écart-type, les valeurs minimales et maximales. Toutes ces valeurs sont semblables sur tous les câbles, y compris sur le câble témoin. L'influence de l'orientation sur la durée de l'accrétion est ainsi diminuée dans le cas du verglas.

La phase d'accrétion d'un événement de verglas dure en moyenne environ 13 heures sur tous les câbles. La durée minimale de 2,5 heures a été observée pour la même tempête sur tous les conducteurs. Pour la durée maximale de 44 heures, elle a également été enregistrée sur la même tempête pour les câbles de garde, du faisceau et témoin. La durée maximale de 37,5 heures sur le câble Bersimis a eu lieu à une période différente car sa cellule de charge était défectueuse lors de l'accrétion de 44 heures.

Tableau 25: Caractéristiques de la durée de la phase d'accrétion en heures dans le cas du verglas

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	39	38	36	32
Moyenne	13,6	13,5	13,4	13,4
écart-type	8,1	7,4	8,2	8,3
valeur minimale	2,5	2,5	2,5	2,5
valeur maximale	44	37,5	44	44



#### VI-4.1.5. LE TAUX D'ACCRÉTION

Les distributions du taux d'accrétion sur tous les conducteurs sont présentées à la figure 30. La largeur des classes est de 10 g/m.h pour les conducteurs de la ligne principale et de 5 g/m.h sur la ligne témoin. L'approximation de ces distributions par des lois lognormales est satisfaisante. L'allure de cette distribution dans le cas du câble témoin est semblable à celle des autres câbles mais l'ordre de grandeur des taux d'accrétion est bien inférieur.

Dans le tableau 26, nous avons reporté la moyenne, l'écart-type et la valeur maximale du taux d'accrétion sur les quatre conducteurs. La moyenne est, dans l'ordre décroissant, sur le câble Bersimis (39 g/m.h), le câble du faisceau (37 g/m.h), le câble de garde (37,3 g/m.h) et le câble témoin (14,2 g/m.h). Le diamètre du conducteur simple considéré varie de la même façon que le taux d'accrétion. Ce facteur est important pour le taux d'accrétion. La configuration en faisceau semble également avoir une influence sur le taux d'accrétion en le diminuant par rapport à un conducteur Bersimis de 35 mm seul.

Les valeurs maximales du taux d'accrétion dans l'ordre décroissant se retrouvent dans le même ordre que la moyenne: sur le câble Bersimis (139,9 g/m.h), le câble du faisceau (131,8 g/m.h), le câble de garde (120,6 g/m.h) et le câble témoin (47,4 g/m.h). Le diamètre du conducteur doit donc être un élément important à considérer lors de l'étude du taux d'accrétion du verglas.

Tableau 26: Caractéristiques du taux d'accrétion en g/m.h dans le cas du verglas

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	39	38	36	32
Moyenne	37,3	39	37	14,2
écart-type	24,8	30,9	30,4	10,3
valeur maximale	120,6	139,9	131,8	47,4

#### VI-4.2. LA CHARGE ET LE TAUX D'ACCRÉTION EN FONCTION DE LA DURÉE DE LA PHASE D'ACCRÉTION

Les relations entre la charge de glace en fin de phase d'accrétion et la durée de la phase d'accrétion sont représentées pour les quatre types de conducteurs à la figure 31 sous formes de graphiques. L'allure générale de ces graphiques montre que la charge de glace a tendance à augmenter avec la durée de l'accrétion sur tous les câbles. En dessous de 15 heures, une grande majorité des charges (de l'ordre de 90%) sont inférieures à 0,5 kg/m sur la ligne principale et à 0,25 kg/m sur la ligne témoin. Au dessus de 15 heures, les proportions de charges supérieures à 0,5 kg/m et à 0,25 kg/m respectivement sur les deux lignes sont entre 30% et 50 %.

Il est également intéressant de remarquer que les charges correspondant aux durées maximales (de 44 heures sur les câbles de garde, du faisceau et témoin, et de 37,5 heures sur le câble Bersimis) sont dans la moyenne. De même, les durées

correspondant aux charges maximales, de l'ordre de 1,8 kg/m sur les câbles de la ligne principale et de 0,6 kg/m sur le câble témoin, se trouvent aussi dans la moyenne.

À la figure 32 sont présentées les relations entre le taux d'accrétion et la durée de la phase d'accrétion. Les allures de ces courbes sont des hyperboles décroissantes qui atteignent leurs valeurs maximales pour les durées courtes et leurs valeurs minimales pour les durées longues. La courbe du câble témoin est moins intense que les autres car sur ce câble le taux d'accrétion est moins important. Un phénomène de verglas à fort taux d'accrétion (supérieur à 60 g/m.h) dépasse rarement les 10 heures sur les câbles de la ligne principale. Les deux taux d'accrétion les plus élevés ont été observés sur des tempêtes qui ont duré environ 5 heures.

#### **VI-4.3. LE MODÈLE DE RÉGRESSION DU TAUX D'ACCRÉTION**

Nous avons appliqué le même raisonnement que pour le givre sur le nombre d'alarmes du givromètre et la hauteur des précipitations d'eau. Ainsi, nous les avons remplacés dans l'étude de régression par les deux facteurs suivants: le taux d'alarmes et le taux des précipitations par unité de temps.

Les variables utilisées dans tout le reste du texte sont notées:

$Y$ : le taux d'accrétion de la phase d'accrétion.

$X_1$ : la vitesse moyenne du vent perpendiculaire pendant la phase d'accrétion.

$X_2$ : la température moyenne de l'air pendant la phase d'accrétion.

$X_3$ : le taux d'alarmes du givromètre pendant la phase d'accrétion.

$X_4$ : le taux des précipitations en millimètres d'eau pendant la phase d'accrétion.

Les coefficients de corrélation (voir V-2.1.2.) entre les variables de régression et le taux d'accrétion sont présentés aux tableaux 27 à 30 pour les quatre types de conducteurs. Rappelons que le coefficient de corrélation quantifie la relation linéaire entre deux variables.

Tableau 27: Coefficients de corrélation dans le cas du verglas sur le câble de garde

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	taux d'accrétion
$X_1$	1	-0,001	0,37	-0,2	0,47
$X_2$	-0,001	1	-0,06	0,29	0,11
$X_3$	0,37	-0,06	1	-0,28	0,27
$X_4$	-0,2	0,29	-0,28	1	-0,07
taux d'accrétion	0,47	0,11	0,27	-0,07	1

Tableau 28: Coefficients de corrélation dans le cas du verglas sur le câble Bersimis

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	taux d'accrétion
$X_1$	1	-0,03	0,33	-0,23	0,38
$X_2$	-0,03	1	-0,09	0,27	0,14
$X_3$	0,33	-0,09	1	-0,30	0,12
$X_4$	-0,23	0,27	-0,30	1	-0,11
taux d'accrétion	0,38	0,14	0,12	-0,11	1

Tableau 29: Coefficients de corrélation dans le cas du verglas sur un câble du faisceau

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	taux d'accrétion
$X_1$	1	0,002	0,26	-0,14	0,36
$X_2$	0,002	1	-0,07	0,03	0,13
$X_3$	0,26	-0,07	1	-0,02	0,03
$X_4$	-0,14	0,03	-0,02	1	0,76
taux d'accrétion	0,36	0,13	0,03	0,76	1

Tableau 30: Coefficients de corrélation dans le cas du verglas sur le câble témoin

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	taux d'accrétion
$X_1$	1	0,02	0,28	0,11	0,24
$X_2$	0,02	1	-0,01	0,08	0,075
$X_3$	0,28	-0,01	1	-0,07	0,16
$X_4$	0,11	0,08	-0,07	1	0,5
taux d'accrétion	0,24	0,075	0,16	0,5	1

L'ordre d'importance relative des coefficients de corrélation avec le taux d'accrétion est différent pour chaque câble. Cet ordre est reporté dans le tableau 31 suivant.

Tableau 31: Ordre décroissant des coefficients de corrélation avec le taux d'accrétion sur les quatre types de câbles

garde	Bersimis	faisceau	témoin
$X_1$	$X_1$	$X_4$	$X_4$
$X_3$	$X_2$	$X_1$	$X_1$
$X_2$	$X_3$	$X_2$	$X_3$
$X_4$	$X_4$	$X_3$	$X_2$

Le taux des précipitations ( $X_4$ ) a le coefficient de corrélation avec le taux d'accrétion qui change le plus. Dans les cas des câbles de garde et Bersimis, ce coefficient est négatif et vaut respectivement -0,07 et -0,11. De plus, sur ces mêmes câbles, les coefficients de corrélation avec la température ( $X_2$ ) et le taux d'alarmes ( $X_3$ ) sont tous supérieurs à 0,27. Pour les câbles du faisceau et témoin, ces coefficients sont tous inférieurs à 0,08 et les coefficients de corrélation entre  $X_4$  et le taux d'accrétion sont respectivement de 0,50 et 0,76. Ainsi, dans le cas des câbles de garde et Bersimis, une partie de la variance de  $X_4$  est expliquée par son lien avec  $X_2$  et  $X_3$ ; ce qui fait diminuer sa corrélation avec le taux d'accrétion. Cela a même pour effet de changer le signe du coefficient de corrélation entre  $X_4$  et le taux d'accrétion sur les câbles de garde et Bersimis.

Dans les tableaux 32 à 35, nous reportons les coefficients de corrélation multiple issus de l'analyse de régression effectuée avec le logiciel WinStat sur les quatre types de câbles étudiés. Les coefficients sont faibles sur les câbles de garde, Bersimis et témoin, avec 24,45 %, 17,20 % et 32,08 % respectivement. Sur le câble du faisceau, cette valeur est de 65,21 % et elle montre que l'équation de régression linéaire est une bonne

approximation de la relation entre le taux d'accrétion et les variables de régression dans ce cas.

Tableau 32: Résultats de l'analyse de régression dans le cas du verglas sur le câble de garde

nombre de variables	variables	R <sup>2</sup> en %
1	$X_1$	22,87
2	$X_1, X_3$	23,72
3	$X_1, X_3, X_2$	24,44
4	$X_1, X_3, X_2, X_4$	24,45

Tableau 33: Résultats de l'analyse de régression dans le cas du verglas sur le câble Bersimis

nombre de variables	Variables	R <sup>2</sup> en %
1	$X_1$	15,07
2	$X_1, X_2$	15,95
3	$X_1, X_2, X_4$	16,78
4	$X_1, X_2, X_4, X_3$	17,20

Tableau 34: Résultats de l'analyse de régression dans le cas du verglas  
sur un câble du faisceau

nombre de variables	Variables	R <sup>2</sup> en %
1	$X_4$	57,97
2	$X_4, X_1$	64,35
3	$X_4, X_1, X_2$	65,10
4	$X_4, X_1, X_2, X_3$	65,21

Tableau 35: Résultats de l'analyse de régression dans le cas du verglas  
sur le câble témoin

nombre de variables	Variables	R <sup>2</sup> en %
1	$X_4$	25,99
2	$X_4, X_3$	30,20
3	$X_4, X_3, X_1$	31,99
4	$X_4, X_3, X_1, X_2$	32,08

Pour les câbles de garde et Bersimis, la variable qui explique le plus la variation du taux d'accrétion ( $Y$ ) est la vitesse moyenne du vent perpendiculaire à la ligne principale ( $X_1$ ); pour les câbles du faisceau et témoin, le taux des précipitations ( $X_4$ ) explique le maximum de la variance de  $Y$ . Cette différence est due aux relations entre  $X_4$  et les variables  $X_2$  et  $X_3$ . En effet, les coefficients de corrélation entre  $X_4$  et les deux variables  $X_2$  et  $X_3$  sont élevés sur les câbles de garde et Bersimis (respectivement 0,29 et -0,28, et 0,27 et -0,30) alors que sur les deux autres câbles, ils sont négligeables, mais de mêmes signes (respectivement 0,03 et -0,02, et 0,08 et -0,07). Ainsi, dans ce premier cas, la variance de  $Y$ ,



qui serait expliquée par  $X_1$  si les corrélations étaient plus faibles, est liée aux variables  $X_2$  et  $X_3$ . Donc, la part du coefficient de corrélation multiple expliquée par  $X_1$  est plus petite, ce qui détermine son importance dans les tableaux 32 et 33. Cette différence entre les données des câbles n'a pas d'explication physique. Elle provient des écarts des relations citées (entre  $X_1$  d'une part, et  $X_2$  et  $X_3$  d'autre part) par rapport à des relations strictement linéaires. Compte tenu de la physique de l'accrétion du verglas et des effets produits par les outils statistiques, le paramètre qui explique au mieux la variance du taux d'accrétion sur tous les câbles est le taux des précipitations en millimètres d'eau pendant la phase d'accrétion ( $X_1$ ). Puisque le verglas est produit par des précipitations, ce lien étroit est confirmé par le phénomène physique.

Dans le cas du câble témoin, la variance du taux d'accrétion expliquée par la vitesse moyenne du vent perpendiculaire ( $X_1$ ) est beaucoup plus faible que dans le cas des autres câbles. Le diamètre du conducteur étant un paramètre important de l'accrétion dans le cas du verglas, cette faible proportion de la variation expliquée est certainement due à l'orientation de la ligne. Ainsi, l'orientation de la ligne, et donc la direction du vent, a un effet faible sur la variabilité du taux d'accrétion lorsque la glace accrétée est du verglas.

Ayant fait l'analyse de régression par type de glace, nous pensions que l'effet de la température ( $X_2$ ) sur le taux d'accrétion était déjà considéré par cette classification. Mais, comme nous l'avons montré dans l'étude de la relation entre la température et le taux d'accrétion,  $X_2$  est importante et il faut en tenir compte pour expliquer le taux d'accrétion du verglas.

Deux explications différentes sont possibles pour expliquer les faibles coefficients de corrélation multiple sur les câbles de garde, Bersimis et témoin:

- un mauvais choix des variables de régression,

- la non-linéarité de la relation entre les variables de régression et le taux d'accrétion.

Nous pouvons mettre en doute la première raison parce que, dans le cas du câble du faisceau, la variance du taux d'accrétion est expliquée à 65 % par les variables de régression. Puisque les lois physiques qui régissent l'accrétion ne changent pas avec le type de conducteur, ce choix des variables est bon, et ce sur tous les câbles. Les faibles valeurs de  $R^2$  sont alors expliquées par la relation non-linéaire entre les variables de régression et le taux d'accrétion. Dans le cas du faisceau, cette relation est bien approchée par l'équation de régression linéaire.

En conclusion, les variables utilisées pour l'étude de régression du verglas ne permettent pas de différencier l'effet du diamètre du conducteur sur le taux d'accrétion. De plus, l'orientation du conducteur a peu d'influence sur le taux d'accrétion du verglas. Finalement, le paramètre essentiel à considérer dans cette étude est le taux des précipitations.

## **VI-5. LA NEIGE MOUILLÉE**

Pour ce type de glace, le nombre d'observations est faible: il varie entre 2 et 7 selon le type de conducteur. Ainsi, pour toute cette partie, les statistiques ont peu de valeur puisqu'elles sont supportées par peu de données.

### **VI-5.1. ÉTUDE DES DISTRIBUTIONS**

#### **VI-5.1.1. LA TEMPÉRATURE**

Au tableau 36 ci-dessous, nous présentons la valeur moyenne, l'écart-type, et les valeurs maximales et minimales de la température moyenne enregistrée pendant la phase d'accrétion, pour les quatre types de câbles.

Tableau 36: Caractéristiques de la température en °C dans le cas de la neige mouillée

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	5	7	7	2
moyenne	0,3	0,2	0,2	0,1
écart-type	0,3	0,3	0,2	0,03
valeur maximale	0,8	0,8	0,8	0,2
valeur minimale	0,1	0,1	0,1	0,1

Les températures moyennes sont positives pour toutes les accrétions de neige mouillée sur tous les câbles. Dans les cas des câbles de garde, Bersimis et faisceau, elles valent respectivement 0,3°C, 0,2°C et 0,2°C. Quant au câble témoin, la moyenne est de 0,1°C; cette différence provient d'une accrétion observée uniquement sur les autres câbles à une température moyenne de 0,8°C. L'écart-type est important sur les câbles de la ligne principale (de l'ordre de 100 %) mais faible sur le câble témoin (environ 25 %) où les deux observations sont pratiquement identiques. Les valeurs maximales et minimales sont semblables sur les câbles de la ligne principale et différentes pour le câble témoin où il n'y pas l'accrétion citée à 0,8°C. Dans la base de données, nous remarquons que pendant la phase d'accrétion, les températures enregistrées sont en grande partie comprises entre 0°C et

1°C. Les températures maximales et minimales de l'air observées sont respectivement de 1,5°C et de -0,5°C.

Nous ne présentons pas les histogrammes de fréquence de la température et la relation entre la température et le taux d'accrétion, contrairement aux cas du givre et du verglas, parce que le faible nombre d'observations de neige mouillée ne permet pas de conclure.

#### **VI-5.1.2. LE VENT**

Les valeurs moyennes, l'écart-type, et les valeurs maximales et minimales de la vitesse moyenne du vent perpendiculaire pendant la phase d'accrétion sont présentés au tableau 37.

Les valeurs sont semblables sur tous les conducteurs. L'intensité moyenne et l'écart-type sont respectivement de l'ordre de 22 km/h et de 9 km/h. Les valeurs maximales et minimales atteintes sont d'environ 30 km/h et 4 km/h. Toutes ces valeurs sont proches de celles dans le cas du verglas sauf pour les valeurs maximales qui sont légèrement inférieures.

De même que dans le cas de la température moyenne pendant la phase d'accrétion de la neige mouillée, les distributions de la vitesse du vent et les relations avec le taux d'accrétion ne sont pas présentées.

Tableau 37: Caractéristiques de la vitesse du vent perpendiculaire en km/h dans le cas de la neige mouillée

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	5	7	7	2
moyenne	23,3	21,2	21,3	21,4
écart-type	9,1	10,8	10,8	8,3
valeur maximale	31,9	31,9	31,9	27,2
valeur minimale	11,6	3,8	3,8	15,5

### VI-5.1.3. LA CHARGE DE GLACE

La valeur moyenne, l'écart-type et la valeur maximale de la charge pour tous les types de conducteur sont insérés dans le tableau 38.

Tableau 38: Caractéristiques de la charge de glace en fin de phase d'accrétion en kg/m dans le cas de la neige mouillée

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	5	7	7	2
moyenne	0,12	0,11	0,11	0,06
écart-type	0,09	0,08	0,07	0,02
valeur maximale	0,26	0,28	0,27	0,08

Les charges moyennes sont presque identiques sur les trois conducteurs de la ligne principale, et elle vaut environ la moitié de ces dernières sur le câble témoin. Les écarts-types sont supérieurs à 60 % sur la ligne principale, ce qui montre que la charge varie beaucoup. Pour le câble témoin, l'écart-type est petit car il n'y a que deux observations. Les valeurs maximales sont du même ordre sur les câbles de la ligne principale, et cette valeur est bien inférieure dans le cas du câble témoin.

Les valeurs moyennes et maximales sont nettement inférieures à celles atteintes dans le cas du verglas où elles valent approximativement 0,4 kg/m et 1,6 kg/m respectivement.

#### **VI-5.1.4. LA DURÉE DE LA PHASE D'ACCRÉTION**

Dans le tableau 39, nous présentons quelques propriétés statistiques de la durée de la phase d'accrétion: la moyenne, l'écart-type, les valeurs minimales et maximales.

Les valeurs moyennes sont observées, dans l'ordre décroissant, sur le câble témoin (11,5 heures), le câble de garde (7,2 heures), le câble Bersimis et le câble du faisceau (5,7 heures). Sur le câble témoin, les durées des deux accrétions de neige mouillée sont supérieures à 10,5 heures. Sur les autres câbles, les durées de ces deux accrétions sont également supérieures à 10,5 heures. Nous ne pouvons pas conclure à partir de ces deux données sur l'effet de l'orientation sur la durée de la phase d'accrétion de la neige mouillée. La moyenne de la durée sur le câble de garde est supérieure à celle des autres câbles de la ligne principale. Cet ordre n'est pas dû à des durées différentes sur les câbles Bersimis et du faisceau, mais à un nombre d'observations inférieur sur le câble de garde. Ainsi, les deux

observations de différence sont expliquées par une phase de maintien plus longue sur le câble de garde, et donc pas de phase d'accrétion. Les écarts-types s'expliquent par les mêmes comportements que les valeurs moyennes.

Les valeurs minimales et maximales sont semblables sur tous les câbles sauf sur le câble témoin. Les durées minimales et maximales sont respectivement de 1,5 heures et 12,5 heures sur les câbles de la ligne principale.

La durée de la phase d'accrétion dans le cas du verglas est plus longue que dans le cas de la neige mouillée. Cette remarque est basée sur un nombre d'observations bien plus important dans le premier cas .

Tableau 39: Caractéristiques de la durée de la phase d'accrétion en heures dans le cas de la neige mouillée

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	5	7	7	2
moyenne	7,2	5,7	5,7	11,5
écart-type	4,7	4,4	4,4	1,4
valeur minimale	1,5	1,5	1,5	10,5
valeur maximale	12,5	12,5	12,5	12,5

#### VI-5.1.5. LE TAUX D'ACCRÉTION

Dans le tableau 40, nous avons reporté la moyenne, l'écart-type et la valeur maximale du taux d'accrétion sur les quatre conducteurs. La moyenne est, dans l'ordre

décroissant, sur le câble Bersimis (24,4 g/m.h), le câble du faisceau (22,7 g/m.h), le câble de garde (21 g/m.h) et le câble témoin (5,6 g/m.h); cet ordre est identique à celui du verglas. Comme dans le cas du verglas, le taux d'accrétion moyen varie comme le diamètre du conducteur considéré et la configuration en faisceau diminue le taux d'accrétion moyen par rapport à un conducteur Bersimis seul. Pour le câble témoin, la moyenne est faible mais, comme nous l'avons indiqué dans la partie précédente, les durées des deux observations sont supérieures à 10,5 heures. Les valeurs du taux d'accrétion enregistrées sur ce câble sont nettement inférieures aux autres câbles. Les écarts-types sont petits sur le câble Bersimis, le câble du faisceau, et le câble témoin. Sur le câble de garde, l'écart-type est important (60 %); le taux d'accrétion est très variable car le nombre d'observations est plus faible que sur les autres câbles.

Les valeurs maximales sont observées, dans l'ordre décroissant, sur le câble de garde (46 g/m.h), le câble Bersimis (42,9 g/m.h), le câble du faisceau (39,4 g/m.h), et le câble témoin (6,8 g/m.h).

Toutes les valeurs du taux d'accrétion de la neige mouillée sont inférieures à celles observées dans le cas du verglas.

Tableau 40: Caractéristiques de taux d'accrétion en g/m.h dans le cas de la neige mouillée

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	5	7	7	2
moyenne	21	24,4	22,7	5,6
écart-type	14,7	10,6	9	1,7
valeur maximale	46	42,9	39,4	6,8



## VI-5.2. LE MODÈLE DE RÉGRESSION DU TAUX D'ACCRÉTION

Comme dans les cas du givre et du verglas, nous avons remplacé le nombre d'alarmes et la hauteur des précipitations d'eau dans l'étude de régression par le taux d'alarmes et le taux des précipitations par unité de temps.

De nouveau, les variables utilisées sont notées:

$Y$ : le taux d'accrétion de la phase d'accrétion.

$X_1$ : la vitesse moyenne du vent perpendiculaire pendant la phase d'accrétion.

$X_2$ : la température moyenne de l'air pendant la phase d'accrétion.

$X_3$ : le taux d'alarmes du givromètre pendant la phase d'accrétion.

$X_4$ : le taux des précipitations en millimètres d'eau pendant la phase d'accrétion.

Nous n'avons pas effectué d'étude de corrélation car le nombre d'observations est trop petit (entre 2 et 7). En effectuant ce genre d'étude sur si peu de données, le risque d'obtenir des conclusions erronées est fort. De plus, du fait du manque de données, nous n'avons considéré que les câbles Bersimis et un câble du faisceau (qui ont chacun 7 observations) dans notre analyse de régression; le logiciel utilisé Winstat ne présente pas les résultats dans le cas des câbles de garde et témoin car le nombre de données n'est pas suffisant pour avoir une valeur statistique.

Les résultats de l'analyse de régression pour le câble Bersimis et un câble du faisceau sont présentés aux tableaux 41 et 42 sous forme du coefficient de corrélation multiple. Dans les deux cas, l'ordre décroissant des variables, en se basant sur ce coefficient, est le même, soit la vitesse du vent ( $X_1$ ), la température ( $X_2$ ), le taux d'alarmes

( $X_3$ ) et le taux des précipitations ( $X_4$ ). Mais, nous remarquons que cet ordre n'est pas identique à celui des proportions relatives de l'explication de la variation de la réponse dans les deux cas. En effet, en citant le cas du câble Bersimis, la vitesse du vent ( $X_1$ ) explique 49,96 % de la variance du taux d'accrétion, le taux des précipitations ( $X_4$ ) explique 20,83 %, le taux d'alarmes ( $X_3$ ) explique 10,04 % et la température ( $X_2$ ) explique 7,29 %, alors que l'ordre de régression est  $X_1, X_2, X_3, X_4$ . Dans les cas des analyses de régression pour le givre et le verglas, ces deux ordres étaient les mêmes.

Tableau 41: Résultats de l'analyse de régression dans le cas de la neige mouillée sur le câble Bersimis

nombre de variables	variables	R <sup>2</sup> en %
1	$X_1$	49,96
2	$X_1, X_2$	57,25
3	$X_1, X_2, X_3$	67,29
4	$X_1, X_2, X_3, X_4$	88,12

Tableau 42: Résultats de l'analyse de régression dans le cas de la neige mouillée sur un câble du faisceau

nombre de variables	variables	R <sup>2</sup> en %
1	$X_1$	33,9
2	$X_1, X_2$	45,9
3	$X_1, X_2, X_3$	62,76
4	$X_1, X_2, X_3, X_4$	82,4

L'ordre  $X_1, X_2, X_3, X_4$  fourni par l'analyse de régression est la combinaison des variables qui expliquent le mieux la variation du taux d'accrétion: la meilleure équation de

régression avec une variable comporte  $X_1$ ; avec deux variables, elle comporte  $X_1$  et  $X_2$ ; et, avec trois variables, il faut inclure  $X_1$ ,  $X_2$  et  $X_3$ . Ainsi, dans le cas de la neige mouillée où nous avons peu d'observations, l'ajout de la variable  $X_3$ , par exemple, à l'équation en  $X_1$ , est la combinaison qui optimise l'explication de la variation de  $Y$ . Cela est valide bien que l'explication de la variation totale de  $Y$  n'est expliquée qu'à 7,29 % par  $X_3$ , en dernière position. Ce résultat un peu surprenant peut être relié au faible nombre d'observations et à la grande variation de celles-ci dans le cas de la neige mouillée.

Finalement, pour les deux câbles étudiés, les facteurs les plus importants dans l'explication de la variation totale du taux d'accrétion de la neige mouillée sont l'intensité du vent perpendiculaire, et ensuite, le taux des précipitations par unité de temps. La vitesse du vent agit sur le taux d'accrétion par le biais du débit de gouttelettes qui percutent le conducteur. La neige mouillée étant créée par des précipitations, le paramètre qui tient compte de celles-ci est forcément un élément important à considérer. Le taux d'alarmes du givromètre et la température sont les moins explicatifs.

## **VI-6. LES MÉLANGES**

### **VI-6.1. ÉTUDE DES DISTRIBUTIONS**

#### **VI-6.1.1. LA TEMPÉRATURE**

L'histogramme de fréquence de la température, dans le cas du câble de garde, est présenté à la figure 33. La largeur des classes est de 1°C. Cette distribution montre que la moyenne n'est pas représentative de la distribution car les fréquences sont semblables sur tout l'intervalle de variation. Dans ce cas, l'écart-type est une valeur qui représente mieux les propriétés de cette distribution.

Dans le tableau 43 ci-dessous, nous avons reporté la valeur moyenne, l'écart-type et les valeurs maximales et minimales de la température moyenne enregistrée pendant la phase d'accrétion pour les quatre types de câbles.

Tableau 43: Caractéristiques de la température en °C dans le cas des mélanges

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	14	12	13	13
moyenne	-5	-4,5	-4,6	-4,7
écart-type	3,1	3,1	2,7	2,7
valeur maximale	-1,2	-1,2	-1,2	-1,2
valeur minimale	-10,3	-10,3	-10,3	-10,3

Les températures moyennes sont semblables pour tous les câbles; elles varient entre -5°C et -4,5°C. Ces températures moyennes sont comprises entre la moyenne dans le cas du verglas (environ -1°C) et la moyenne dans le cas du givre (environ -6°C) puisque les mélanges sont composés de ces deux types de glace. Les coefficients de variation sont importants; ils sont compris entre 57 % et 68 %. Ces valeurs montrent bien le caractère variable de ce type de glace. Les valeurs maximales et minimales sont respectivement de -1,2°C et de -10,3°C, sur tous les conducteurs. Lorsque la température moyenne de l'accrétion pour les mélanges est proche de celle du verglas, le type de glace est composé en plus grande partie de verglas que de givre; le même raisonnement s'applique au givre. Mais,

lorsque la température de formation est intermédiaire, l'accrétion peut être composée de deux parts comparables de verglas et de givre.

À la figure 34 sont reportés le taux d'accrétion en fonction de la température de l'air pour les quatre types de câbles. Une tendance croissante est observée sur tous les conducteurs de la ligne principale; plus la température est proche de 0°C, plus le taux d'accrétion est élevé. En effet, à ces températures les gouttelettes surfondues peuvent ruisseler autour du conducteur et provoquer un taux d'accrétion élevé. Sur le câble témoin cette remarque n'est pas vérifiée.

#### **VI-6.1.2. LE VENT**

À la figure 35, nous avons représenté l'histogramme de fréquence de la vitesse du vent perpendiculaire à la ligne principale pour le câble de garde avec une largeur de classe de 2 km/h. À nouveau, cette distribution est quasi-uniforme: les nombres d'observations sont très proches pour toutes les classes non-nulles.

Dans le tableau 44 ci-dessous, nous présentons les valeurs moyennes, l'écart-type, et les valeurs maximales et minimales de la vitesse moyenne du vent perpendiculaire pendant la phase d'accrétion.

Le nombre d'observations de la vitesse du vent est différent du nombre d'observations de la température dans le cas du câble de garde et du câble Bersimis parce que l'anémomètre n'a pas enregistré de données pour certaines accrétions sur ces câbles.

Les valeurs moyennes de l'intensité du vent (environ 18 km/h) sont faibles par rapport au cas du verglas sur tous les conducteurs. De plus, elles sont très proches de celles du givre. Les coefficients de variation sont de l'ordre de 30% et montrent que l'intensité du vent ne varie pas de façon considérable dans le cas des mélanges.

Tableau 44: Caractéristiques de la vitesse du vent perpendiculaire en km/h pour les mélanges

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	14	12	13	13
Moyenne	17,7	17,5	18,7	17,8
écart-type	5,6	5,9	6,5	5,4
valeur maximale	25,6	25,6	31,4	25,6
valeur minimale	10,2	10,2	10,2	10,2

Les valeurs maximales (environ 25 km/h) et minimales (environ 10 km/h) sont respectivement inférieures et supérieures aux mêmes valeurs dans le cas du givre. L'intervalle de variation de l'intensité du vent est bien plus petit que dans le cas du givre et du verglas. Cette propriété est certainement due à la durée de l'accrétion qui est supérieure à celle des autres types de glace: la moyenne est ainsi réduite.

Les relations entre la vitesse du vent perpendiculaire et le taux d'accrétion sont représentées à la figure 36 sous forme de graphiques pour tous les types de conducteurs. La corrélation positive entre ces deux variables est observée. Cette tendance exprime bien le lien entre le nombre de gouttelettes qui percute le conducteur et le nombre de gouttelettes qui accrètent sur celui-ci.

### VI-6.1.3. LA CHARGE DE GLACE

Nous avons reporté à la figure 37 les histogrammes de fréquence de la charge de glace en fin de phase d'accrétion sur tous les types de conducteurs. Les classes sont de largeur 0.2 kg/m. Les deux premières classes représentent au moins 45 % du nombre total d'observations dans tous les cas de conducteurs. Les autres classes (dont la fréquence est non nulle) ont chacune un nombre d'observations pratiquement égal.

La valeur moyenne, l'écart-type et la valeur maximale de la charge atteinte à la fin de la phase d'accrétion pour tous les types de conducteurs sont insérés dans le tableau 45.

La valeur maximale de la charge moyenne est atteinte sur le câble de garde à 0,71 kg/m, suivi du câble Bersimis (0,62 kg/m), d'un câble du faisceau (0,52 kg/m), et du câble témoin (0,28 kg/m). Ces charges moyennes sont supérieures aux cas du givre et du verglas parce que les durées de la phase d'accrétion dans le cas des mélanges sont plus longues. Les coefficients de variation sont de 75 % sur le câble du faisceau et supérieurs à 85 % sur les autres câbles. Les charges sont très dispersées car elles dépendent de la proportion de givre et de verglas dans l'accrétion.

Les charges maximales ont les mêmes ordres de grandeur que pour le verglas et le givre (dépendant des câbles) dans le cas de la ligne principale. Pour le câble témoin, cette valeur est supérieure aux cas du givre et du verglas.

Tableau 45: Caractéristiques de la charge de glace en fin de phase d'accrétion en kg/m dans le cas des mélanges

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	14	12	13	13
Moyenne	0,71	0,62	0,52	0,28
écart-type	0,6	0,55	0,39	0,25
valeur maximale	1,89	1,89	1,12	0,95

#### VI-6.1.4. LA DURÉE DE LA PHASE D'ACCRÉTION

Les histogrammes de fréquence de la durée de la phase d'accrétion sont présentés à la figure 38 pour les quatre types de conducteurs. Toutes les classes ont une largeur de 10 heures. La première classe qui, dépendant des câbles, comprend les durées entre 10-15 heures et 20-25 heures, est la plus fréquente avec au moins 25 % des observations totales. Les autres classes ont des fréquences pratiquement égales variant entre une et deux observations.

Au tableau 46, nous présentons quelques propriétés statistiques de la durée de la phase d'accrétion: la moyenne, l'écart-type, les valeurs minimales et maximales.

Les valeurs moyennes de la durée de la phase d'accrétion dans le cas des mélanges sont plus grandes que dans les cas du givre (environ 30 heures) et du verglas (environ 13 heures) sur tous les câbles. Les moyennes les plus importantes sont sur le câble



de garde (56,6 heures) et le câble Bersimis (52,8 heures). Le câble du faisceau et le câble témoin ont des durées moyennes respectives de 46,7 heures et de 47,5 heures. Cette faible valeur sur ce premier conducteur peut être expliquée par la configuration en faisceau qui limite l'accrétion sur les câbles "cachés". La durée est petite sur le câble témoin à cause de son orientation dans l'axe est-ouest des vents dominants. Les accrétions du givre se déplacent presque horizontalement dans la direction du vent; ainsi, elles ne percutent pas ce câble à angle droit.

La distribution de la durée est très étalée: les coefficients de variation sont supérieurs à 63 %, les valeurs minimales sont de l'ordre d'une dizaine d'heures et les valeurs maximales d'une centaine d'heures. La durée dépend de la proportion de chaque type de glace (verglas et givre) dans les mélanges.

Tableau 46: Caractéristiques de la durée de la phase d'accrétion en heures dans le cas des mélanges

	type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	14	12	13	13
Moyenne	56,6	52,8	46,7	47,5
écart-type	41,7	40,1	30,4	30,1
valeur minimale	9,5	12,5	15	16
valeur maximale	144	144	103	103

### VI-6.1.5. LE TAUX D'ACCRÉTION

À la figure 39, les distributions du taux d'accrétion sont présentées sous forme d'histogrammes de fréquence avec des classes de largeur 5 g/m.h. Dans le cas du câble témoin dont l'orientation est perpendiculaire à celle des autres câbles, l'intervalle de variation du taux d'accrétion est au moins deux fois plus petit. L'orientation du conducteur a une telle influence sur le taux d'accrétion que nous pouvons admettre que la part de givre dans ce type de glace est importante. Les distributions sont concentrées à des valeurs faibles: la majorité des observations sont inférieures à 20 g/m.h sur les conducteurs de la ligne principale et à 11 g/m.h sur la ligne témoin.

Nous représentons au tableau 47 la moyenne, l'écart-type et la valeur maximale du taux d'accrétion sur les quatre conducteurs. Nous remarquons que sur la ligne principale toutes les moyennes sont de l'ordre de 12 g/m.h. Sur le câble témoin, la moyenne est inférieure en raison de sa direction et elle vaut 5,6 g/m.h. Rappelons que ces mêmes valeurs caractéristiques sont d'environ 38 g/m.h sur la ligne principale et 14 g/m.h sur le câble témoin dans le cas du givre, et, d'environ 12 g/m.h sur la ligne principale et 6 g/m.h sur le câble témoin dans le cas du verglas. Les valeurs des mélanges sont très proches de celles du givre. Ainsi, dans le type de glace nommée mélanges, la durée de l'accrétion de givre est plus importante que la durée de l'accrétion de verglas.

Les coefficients de variation varient entre 52 % et 71 % sur tous les câbles. La distribution des taux d'accrétion est légèrement plus homogène que dans le cas des autres types de glace, notamment le givre et le verglas.

Les valeurs maximales du taux d'accrétion des mélanges sont inférieures à celles de tous les autres types de glace sur le câble de garde (28,2 g/m.h) et le câble témoin (12,5 g/m.h). Sur le câble Bersimis (28,2 g/m.h) et le câble du faisceau (31,4 g/m.h), elles

sont légèrement supérieures à celles du givre. De plus, pour tous les conducteurs, les valeurs maximales sont inférieures à celles du verglas.

Tableau 47: Caractéristiques de taux d'accrétion en g/m.h dans le cas des mélanges

	Type de conducteur			
	garde	Bersimis	un câble du faisceau	témoin
nombre de cas	14	12	13	13
moyenne	12,5	12,3	12	5,6
écart-type	6,6	7,5	8,9	3,2
valeur maximale	28,2	28,2	31,4	12,5

#### VI-6.2. LE MODÈLE DE RÉGRESSION DU TAUX D'ACCRÉTION

Le choix des variables indépendantes pour l'étude de régression est différent de celui utilisé pour les autres types de glace. Au lieu de considérer le taux d'alarmes du givromètre et le taux des précipitations du pluviomètre, nous traitons du nombre d'alarmes et de la quantité de précipitations; ces deux paramètres sont cumulatifs. Cette différence provient du fait que les mélanges sont composés de proportions variables de verglas et de givre; choisir ces nouveaux paramètres permet de quantifier l'influence de chaque type de glace. En effet, l'absence de précipitations est liée à un régime où le mouvement des gouttelettes n'est pas vertical et la glace produite est du givre.

Les variables utilisées sont notées:

$Y$ : le taux d'accrétion de la phase d'accrétion.

$X_1$ : la vitesse moyenne du vent perpendiculaire pendant la phase d'accrétion.

$X_2$ : la température moyenne de l'air pendant la phase d'accrétion.

$X_3$ : le nombre d'alarmes du givromètre pendant la phase d'accrétion.

$X_4$ : la hauteur des précipitations en millimètres d'eau pendant la phase d'accrétion.

Aux tableaux 48 à 51, nous présentons les coefficients de corrélation entre les variables de régression et le taux d'accrétion pour les quatre types de conducteurs.

Tableau 48: Coefficients de corrélation dans le cas des mélanges sur le câble de garde

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	taux d'accrétion
$X_1$	1	0,01	-0,004	0,45	0,43
$X_2$	0,01	1	-0,06	0,51	0,3
$X_3$	-0,004	-0,06	1	-0,006	0,05
$X_4$	0,45	0,51	-0,006	1	0,58
Taux d'accrétion	0,43	0,3	0,05	0,58	1

Tableau 49: Coefficients de corrélation dans le cas des mélanges sur le câble Bersimis

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	taux d'accrétion
$X_1$	1	0,15	-0,56	0,3	0,4
$X_2$	0,15	1	-0,37	0,37	0,2
$X_3$	-0,56	-0,37	1	-0,06	0,06
$X_4$	0,3	0,37	-0,06	1	0,59
Taux d'accrétion	0,4	0,2	0,06	0,59	1

Tableau 50: Coefficients de corrélation dans le cas des mélanges sur un câble du faisceau

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	taux d'accrétion
$X_1$	1	0,08	-0,27	0,2	0,4
$X_2$	0,08	1	-0,12	0,19	0,16
$X_3$	-0,27	-0,12	1	-0,15	-0,12
$X_4$	0,2	0,19	-0,15	1	0,69
Taux d'accrétion	0,4	0,16	-0,12	0,69	1

Tableau 51: Coefficients de corrélation dans le cas des mélanges sur le câble témoin

	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	taux d'accrétion
$X_1$	1	-0,06	-0,54	0,36	0,57
$X_2$	-0,06	1	-0,19	0,24	-0,12
$X_3$	-0,54	-0,19	1	-0,11	-0,004
$X_4$	0,36	0,24	-0,11	1	0,54
taux d'accrétion	0,57	-0,12	-0,004	0,54	1

Les coefficients de corrélations entre la hauteur des précipitations ( $X_4$ ) et la température ( $X_2$ ) varient entre 0,19 et 0,51 pour tous les conducteurs; cette valeur est relativement élevée par rapport aux autres corrélations. Le phénomène physique expliquant ce comportement est le suivant: lorsque la température moyenne croît, la contribution du verglas dans les mélanges augmente aussi; puisque le verglas est produit par des précipitations, cette quantité sera également en hausse.

Une autre relation intéressante à considérer est le nombre d'alarmes du givromètre ( $X_3$ ) en fonction de la vitesse du vent ( $X_1$ ). Ces coefficients de corrélations sont tous négatifs et valent -0,004, -0,56, -0,27 et -0,54, respectivement sur le câble de garde, Bersimis, faisceau et témoin. La faible corrélation sur le câble de garde peut être due à l'éloignement avec la relation linéaire. Cette corrélation négative est assez surprenante, notamment la tendance d'avoir un nombre d'alarmes faible à des vitesses du vent élevées pendant la phase d'accrétion. Elle peut être expliquée par nos manipulations des données. En considérant la moyenne de la vitesse du vent pendant la phase d'accrétion, nous

stabilisons ses variations pour les représenter par une seule valeur sur le domaine considéré. Ainsi, pour avoir une valeur élevée de la moyenne pour une longue durée de phase d'accrétion, il faudrait que la vitesse prenne des valeurs encore plus fortes pour compenser les faibles. Donc, puisque les grandes vitesses sont rares, la probabilité d'obtenir une valeur élevée de la moyenne de vitesse est plus prononcée dans le cas où la durée de l'accrétion est courte. Si l'accrétion est courte, le nombre d'alarmes du givromètre peut également être inférieur aux autres cas. Pour une intensité du vent élevée, le nombre d'alarmes tendra vers une valeur faible.

La vitesse perpendiculaire du vent ( $X_1$ ) et la hauteur des précipitations ( $X_4$ ) ont les coefficients de corrélation avec le taux d'accrétion les plus importants dans tous les cas. Ils valent entre 0,40 et 0,57 pour  $X_1$  et entre 0,54 et 0,69 pour  $X_4$ . Ce dernier facteur indique la proportion de verglas dans l'accrétion. Ainsi, en première approche, le taux d'accrétion des mélanges semble être plus relié au verglas qu'au givre.

Dans les tableaux 52 à 55, nous indiquons les résultats de l'analyse de régression sur le taux d'accrétion avec les variables indépendantes présentées au début de cette partie sous forme du coefficient de corrélation multiple  $R^2$ .

**Tableau 52: Résultats de l'analyse de régression dans le cas des mélanges sur le câble de garde**

nombre de variables	variables	$R^2$ en %
1	$X_4$	28,36
2	$X_4, X_2$	32,61
3	$X_4, X_2, X_3$	34,81
4	$X_4, X_2, X_3, X_1$	34,82

Tableau 53: Résultats de l'analyse de régression dans le cas des mélanges  
sur le câble Bersimis

nombre de variables	variables	R <sup>2</sup> en %
1	$X_4$	35,48
2	$X_4, X_1$	41,77
3	$X_4, X_1, X_3$	56,28
4	$X_4, X_1, X_3, X_2$	57,63

Tableau 54: Résultats de l'analyse de régression dans le cas des mélanges  
sur un câble du faisceau

nombre de variables	variables	R <sup>2</sup> en %
1	$X_4$	48,38
2	$X_4, X_1$	56,51
3	$X_4, X_1, X_2$	57,22
4	$X_4, X_1, X_2, X_3$	57,65

Tableau 55: Résultats de l'analyse de régression dans le cas des mélanges  
sur le câble témoin

nombre de variables	variables	R <sup>2</sup> en %
1	$X_1$	38,88
2	$X_1, X_4$	65,85
3	$X_1, X_4, X_2$	67,29
4	$X_1, X_4, X_2, X_3$	74,56



Les modèles de régression expliquent la variation du taux d'accrétion à 34,82 %, 57,63 %, 57,65 % et 74,56 % respectivement sur le câble de garde, Bersimis, faisceau et témoin. Dans ce dernier cas, l'approximation de ce modèle est convenable.

La hauteur des précipitations ( $X_1$ ) est le facteur qui explique le mieux la variation du taux d'accrétion sur le câble de garde à 28,36 %, sur le câble Bersimis à 35,48 % et sur le câble du faisceau à 48,38 %. Pour le câble témoin, la vitesse du vent ( $X_1$ ) explique la plus grande part de variation avec 38,88 %.

La hauteur des précipitations et la vitesse du vent sont le couple de paramètres le plus important à considérer sur tous les câbles sauf sur le câble de garde. Dans ce cas, le comportement de  $X_1$  ne s'apparente pas aux propriétés physiques de l'accrétion mais à la démarche statistique. La faible valeur de  $R^2$  (34,82 %) est reliée au comportement de ce paramètre.

## **CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS**

Nous avons analysé les données météorologiques et mécaniques provenant du site expérimental de givrage du Mont Valin. Afin d'étudier et comprendre un phénomène de formation de glace atmosphérique, la définition de ses différentes phases est essentielle (Druez, J. et McComber, P., 1991). Nous avons défini, en collaboration avec Sophie Gouzy, la phase d'accrétion grâce à un critère d'identification que nous avons appliqué à la base de données du Mont Valin, de 1986 à 1998. Dans certains cas, les variations de la charge enregistrée sur les câbles peuvent être dues à des phénomènes autres que la glace, tels que les efforts aérodynamiques engendrés par le vent sur les câbles, la dilatation thermique des câbles ou la dérive électronique de l'instrumentation. Une valeur seuil de la charge, pouvant être expliquée par ces phénomènes, a été déterminée pour tous les conducteurs du site. En se basant sur les approximations théoriques et expérimentales de ces effets, la valeur seuil a été évaluée à 61 g/m.

L'étude de la phase d'accrétion, pour les quatre types de glace étudiés (le givre, le verglas, la neige mouillée et les mélanges) a été décomposée en deux parties : l'étude des distributions et l'analyse de régression.

Les deux paramètres météorologiques étudiés ont été la température moyenne de l'air et la vitesse du vent perpendiculaire à la ligne principale, tous deux pendant la phase d'accrétion. Les ordres de grandeur des températures moyennes pendant la phase d'accrétion sont, dans l'ordre croissant,  $-6,5^{\circ}\text{C}$  dans le cas du givre,  $-4,7^{\circ}\text{C}$  dans le cas des mélanges,  $-1,9^{\circ}\text{C}$  dans le cas du verglas et  $+0,2^{\circ}\text{C}$  dans le cas de la neige mouillée. Les ordres de grandeur des moyennes de la vitesse du vent perpendiculaire ont été calculés, dans l'ordre croissant, dans le cas du givre (17 km/h), des mélanges (18 km/h), de la neige

mouillée (21 km/h) et du verglas (25 km/h). Les études du taux d'accrétion pour les quatre types de câbles, et pour le verglas et le givre, permettent de conclure que cette variable est liée au diamètre du conducteur dans le cas du verglas. Dans le cas du givre, l'orientation du conducteur est le paramètre essentiel.

L'analyse de régression sur le taux d'accrétion a été effectuée sur quatre types de glace: le givre, le verglas, la neige mouillée et les mélanges. Le taux d'alarmes du givromètre et l'orientation du conducteur sont des facteurs importants à considérer pour l'étude du taux d'accrétion dans le cas du givre. Quant au verglas, le taux des précipitations est essentiel, mais pas l'orientation du conducteur. De plus, nous avons montré que l'intensité du vent perpendiculaire et le taux des précipitations influencent le taux d'accrétion de la neige mouillée, malgré le faible nombre d'observations. Finalement, la hauteur des précipitations et la vitesse du vent sont le couple de facteurs qui explique au mieux le taux d'accrétion dans le cas des mélanges.

Les valeurs des coefficients de corrélation et de corrélation multiple ne dépassent pas 0,86 et 75 %. Cette donnée montre bien que ces phénomènes sont difficilement représentés par des fonctions linéaires. Les différences entre les signaux du givromètre et du pluviomètre (deux instruments essentiels sur le site) pour les précipitations et les nuages givrants sont très satisfaisantes.

La complexité de l'analyse et de l'interprétation d'une base de données, dans des conditions environnementales difficiles, a rendu ce travail complexe. Cette étude a dégagé des résultats qui sont propres au site, mais dont la validité statistique est renforcée par la taille de la base de données. En incluant les accrétions que nous n'avons pas sélectionnées des saisons 1986-1987 à 1990-1991, la représentativité statistique de cette analyse serait augmentée. La poursuite de ce programme de recherche, avec le

dédoublément des instruments de mesure météorologiques déjà en fonctionnement, permettrait de produire des analyses plus fines et de valider les résultats obtenus lors des saisons antérieures. Ainsi, des études systématiques de la base de données seraient des éléments importants pour le développement de modèles statistiques, ou basés sur les réseaux de neurones.

## **BIBLIOGRAPHIE**

Baillargeon, G., 1990, "Méthodes statistiques de l'ingénieur", Editions SMG, 686 pages.

Bernardin, S., 1989, " Etude et analyse du délestage de glace atmosphérique sur les câbles ", Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la maîtrise en ressources et systèmes, Département des Sciences Appliquées, 153 pages.

Chainé, P., Castonguay, G., 1974, "Une nouvelle approche de la notion d'épaisseur radiale de la glace appliquée à des conducteurs du type en faisceaux", Environnement Canada, 11 pages.

De Lagarde, J., 1995, "Initiation à l'analyse des données", Dunod, 162 pages.

Draper, N.R., Smith, H., 1966, "Applied Regression Analysis", John Wiley & Sons, 407 pages.

Druez, J., McComber, P., 1991, "A comparison of the atmospheric icing on two different size cables", Proceedings of the First International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.528-534.

Druez, J., Mc Comber, P., Félin, B., 1988, "Icing rate measurements made for different cable configurations on an icing test line at Mt. Valin", 1988, Proceedings IW AIS 88, 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Paris, France, pp.477-485.

Druez, J., Louchez, S., McComber, P., 1995a, "Ice shedding from cables", Cold Regions Science and Technology Journal, Vol.23, pp. 377-378.

Druez, J., McComber, P., Laflamme, J., 1995b, "A comparison of glaze and in-cloud icing events on a test line", Proceedings of the 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Copenhagen, Denmark, pp.93-100.

Druez, J., McComber, P., Laflamme, J., 1996, "An analysis of selected atmospheric icing events on test cables", Proceedings of the Fifteenth International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Florence, Italy, Vol. IV., pp.1-9.

Druez, J., McComber, P., Farzaneh, M., 1998, "Correlation between the data of an ice detector and the mass of ice accreted on different conductors", Proceedings of the Eighth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Reykjavik, Iceland, pp.121-126.

Druez, J., McComber, P., Farzaneh, M., 1999, "Analysis of atmospheric icing events observed at the Mount Valin test site during the 1995-96 season", Proceedings of the Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference, Brest, France, pp.574-580.

Gouzy, S., 2000, "Analyse de la phase de maintien de différents types de glace atmosphérique sur des câbles", Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie (en rédaction).

Govoni, J., Ackley, S., 1983, "Field measurements of combined icing and wind loads on a wire", Proceedings of the First International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, CRREL Special Report, Hanover, New Hampshire, United States, pp.205-215.

Haldar, A., Pon, C., McComber, P., Marshall, M.A., Ishac, M., Goel, A., Kastelein, M., 1996, "Validation of ice accretion models for freezing precipitation using field data", Proceedings of the Seventh International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Chicoutimi, Quebec, Canada, pp.189-194.

Kuroiwa, D., 1965, "Icing and Snow Accretion on Electric Wires", Research Report 123 prepared for Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, USA, 10 pages.

Laforte, J.-L., 1998, "Technogénie de l'environnement nordique", Notes de cours, 6MIG918, Université du Québec à Chicoutimi, Département des Sciences Appliquées, 369 pages.

Louchez, P.R., 1998, "Modélisation et Simulation", Notes de cours, 6MIG802, Université du Québec à Chicoutimi, Département des Sciences Appliquées, 153 pages.

Lozowski, E.P., Stallabrass, J.R., Hearty, P.F., 1983, "The icing of an unheated, nonrotating cylinder. Part I: a simulation model", *Journal of Climate and Applied Meteorology*, pp. 2053-2063.

Lozowski, E.P., Gayet, J.F., 1988, "The atmospheric icing: a review", *Proceedings IWAIS 88, 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Paris, France, pp.1-6.

Makkonen, L., 1984, "Modeling of ice accretion on wires", *Journal of Climate and Applied Meteorology*, pp.929-939.

McComber, P., Turgeon, Y., 1991, "Simulation numérique de l'accrétion de givre sur un cable et mesure de la dimension fractale", *Canadian Society of Mechanical Engineering*, pp. 71-89.

McComber, P., Govoni, J., 1985, "An analysis of selected ice accretion measurements on a wire at Mt. Washington", *42nd Eastern Snow Conference*, Montreal, Quebec, Canada, pp.34-43.

McComber, P., Martin, R., Morin, G., Vo Van, L., 1983, "Estimation of combined ice and wind load on overhead transmission lines", *Proceedings of the First International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Hanover, New Hampshire, United States, pp.143-154.

McComber, P., De Lafontaine, J., Laflamme, J., Druez, J., Paradis, A., 1998, "A neural network system to estimate transmission line icing", *Proceedings of the Eighth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Reykjavik, Iceland, pp.101-106.



Minsk, L.D., 1980, " Icing on structures ", CRREL Report 80-31, 18 pages.

Personne, P., 1988, "Effet de la rugosité sur la croissance du givre à faible vitesse: résultats expérimentaux et modélisation", Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, France, 196 pages.

Pytel, A., Kiusalaas, J., 1994, "Engineering Mechanics: Statics", Harper Collins College Publishers, pp.284-303.

Ryerson, C., 1990, "Atmospheric icing rates with elevation on northern New England mountains, U.S.A.", Arctic and Alpine Research, pp.90-97.

Ryerson, C., Claffey, K., 1992, "Ice load measurement experiences at CRREL", U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, USA.

Stein, P.J., Bahlavouni, A., Andersen, D.W., Birmann, M.R., 1998, "Anchorage-Fairbanks inertie snow load monitoring system", Proceedings of the Eighth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Reykjavik, Iceland, pp.131-135.

Takebe, T., et al., 1998, "Observation of icing on Mt. Takaishi test line", Proceedings of the Eighth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Reykjavik, Iceland, pp.259-265.

Thorstein, E., Eliasson, A., 1998, "Observation of icing by tension recorders -comparison of conductors-", Proceedings of the Eighth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Reykjavik, Iceland, pp.247-252.

Tomassone, R., Audrain, S., Lesquoy-de Turckheim, E., Millier, C., 1992, "La régression: nouveaux regards sur une ancienne méthode statistique", Masson, 188 pages.

Wareing, J.B., 1998, "A new severe weather test site in the Shetland Isles", Proceedings of the Eighth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Reykjavik, Iceland, pp.149-154.

## **ANNEXE A**

Tableau 56: Identification des phases d'accrétion dans le cas du givre

Tableau 56-1: Cas du câble de garde

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
1	89/ 4/ 7 09: 00	89/ 4/ 9 08:30	-7.50	X	X
2	89/ 4/18 08: 00	89/ 4/18 15:30	-6.10	X	X
3	91/ 2/ 7 05: 00	91/ 2/ 7 14:30	-2.10	45	0
4	91/11/15 18: 00	91/11/17 21:30	-6.50	220	6.75
5	91/11/21 00: 00	91/11/21 09:30	-3.00	38	0
6	91/11/24 00: 00	91/11/26 00: 0	-3.90	524	7
7	91/12/22 14: 00	91/12/24 05: 0	-9.40	209	2
8	92/ 2/26 16:30	92/ 2/27 10: 00	-10.00	123	0
9	92/ 3/ 5 03: 00	92/ 3/ 5 08:30	-6.80	31	0
10	92/10/23 04:00	92/10/23 12:30	-1.08	27	0
11	92/11/22 06:30	92/11/26 12:00	-4.50	185	0.25
12	92/11/27 04:00	92/11/28 11:00	-6.80	271	0
13	92/12/20 00:00	92/12/21 04:30	-9.30	54	5.25
14	93/ 1/22 13:00	93/ 1/23 21:00	-1.90	135	0.5
15	93/ 3/21 20:00	93/ 3/22 06:00	-7	58	0
16	93/ 4/11 15:30	93/ 4/12 06:30	-3.29	78	0
17	93/ 4/17 23:30	93/ 4/19 13:00	-3.67	221	0.25
18	93/ 4/25 23:30	93/ 4/26 08:30	-5.47	94	0
19	93/10/28 01:00	93/10/28 18:00	-2.21	47	1.5
20	93/11/ 6 09:00	93/11/ 7 09:00	-9.03	231	0.25
21	93/12/20 06: 00	93/12/ 21 15:00	-4.87	70	0
22	93/12/22 08:30	93/12/22 17:30	-12.83	29	0.25
23	94/ 1/10 03:00	94/ 1/10 21:30	-25.66	2	X
24	94/ 2/21 02:30	94/ 2/21 07:30	-6.20	73	0
25	94/ 3/19 22:30	94/ 3/20 06:30	-8.35	76	0
26	94/10/10 04:00	94/10/10 22:30	-1.89	65	0.5
27	94/11/ 7 19:00	94/11/12 11:00	-4.12	424	0.75
28	94/12/25 12:30	94/12/26 10:30	-9.88	51	0
29	94/12/27 21:00	94/12/28 15:00	-8.57	31	0
30	95/ 1/15 20:30	95/ 1/16 22:00	-3.49	42	3.25
31	95/ 4/15 14:30	95/ 4/16 06:30	-3.45	63	0
32	95/ 4/20 01:30	95/ 4/20 07:30	-1.97	73	0.75
33	95/ 4/22 15:00	95/ 4/25 07:30	-7.11	494	2.5
34	95/10/25 08:30	95/10/25 15:00	-1.51	32	0
35	95/11/ 5 07:00	95/11/ 5 11:30	-9.40	30	0
36	95/11/12 14:00	95/11/13 03:30	-7.81	60	1
37	95/11/20 12:00	95/11/23 22:00	-9.04	261	1.5
38	95/12/18 18:00	95/12/19 07:00	-16.86	17	0

X: donnée manquante

(suite à la page suivante)

Tableau 56-1 (suite): Cas du câble de garde

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
39	95/12/22 01:30	95/12/27 16:00	-7.42	46	0
40	96/ 1/13 10:00	96/ 1/14 05:00	-17.36	13	0
41	96/ 2/22 17:00	96/ 2/28 23:30	-7.43	X	15
42	96/ 3/22 11:00	96/ 3/23 10:30	-6.07	155	0
43	96/ 4/ 4 18:00	96/ 4/ 5 07:00	-7.34	34	0
44	96/10/25 20:30	96/10/26 16:30	-1.53	133	0
45	96/11/11 02:00	96/11/13 07:30	-8.19	286	0.5
46	97/ 3/26 08:00	97/ 3/27 08:30	-7.23	53	0
47	98/ 2/16 14:30	98/ 2/17 06:00	-9.57	34	0
48	98/ 2/20 13:00	98/ 2/21 22:30	-5.92	23	0.25
49	98/ 3/10 07:30	98/ 3/12 06:00	-15.95	9	4.75
50	98/ 3/26 04:30	98/ 3/26 22:00	-2.07	54	0
51	98/ 4/25 14:00	98/ 4/26 05:00	-8.25	34	0

Tableau 56-2: Cas du câble Bersimis

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
1	88/ 3/10 04: 00	88/ 3/10 11: 00	-9.01	29	X
2	89/ 4/ 7 09: 00	89/ 4/ 9 08:30	-7.57	X	X
3	89/ 4/18 08: 00	89/ 4/18 15:30	-6.09	X	X
4	91/ 2/ 7 05: 00	91/ 2/ 7 14:30	-2.11	45	0
5	91/11/15 18: 00	91/11/17 21:30	-6.47	220	6.75
6	91/11/21 00: 00	91/11/21 09:30	-3.00	38	0
7	91/11/24 00: 00	91/11/26 00: 0	-3.99	524	7
8	91/12/ 2 00:30	91/12/ 2 06:30	-11.07	4	0
9	91/12/22 14: 00	91/12/24 05: 0	-9.42	209	2
10	92/ 2/26 16:30	92/ 2/27 10: 00	-10.01	123	0
11	92/10/23 04:00	92/10/23 12:30	-1.08	27	0
12	92/11/22 06:30	92/11/26 12:00	-4.48	185	0.25
13	92/11/27 04:00	92/11/28 10:00	-6.79	271	0
14	92/12/20 00:00	92/12/21 05:00	-9.30	54	5.25
15	92/12/22 16:30	92/12/23 08:30	-8.84	59	0
16	93/ 1/22 13:00	93/ 1/23 21:00	-1.89	135	0.5
17	93/ 3/21 20:00	93/ 3/22 06:00	-6.87	58	0
18	93/ 4/11 15:30	93/ 4/12 06:30	-3.29	78	0
19	93/ 4/17 23:30	93/ 4/19 13:00	-3.67	221	0.25
20	93/ 4/25 23:30	93/ 4/26 08:30	-5.47	94	0
21	93/10/28 01:00	93/10/28 18:00	-2.21	47	1.5

X: donnée manquante

(suite à la page suivante)

Tableau 56-2 (suite): Cas du câble Bersimis

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
22	93/10/29 23:30	93/10/30 08:00	-2.38	48	1
23	93/11/ 6 09:00	93/11/ 7 11:30	-9.03	231	0.25
24	93/12/20 06: 00	93/12/21 12: 00	-4.87	70	0
25	93/12/22 08:30	93/12/22 17:30	-12.83	29	0.25
26	94/ 2/21 02:30	94/ 2/21 08:00	-6.20	73	0
27	94/ 3/19 22:30	94/ 3/20 06:30	-8.35	76	0
28	94/10/10 04:00	94/10/10 22:30	-1.89	65	0.5
29	94/11/ 7 19:00	94/11/12 10:30	-4.12	424	0.75
30	95/ 1/15 20:30	95/ 1/16 22:00	-3.49	42	3.25
31	95/ 4/15 14:30	95/ 4/16 06:00	-3.45	63	0
32	95/ 4/20 01:30	95/ 4/20 07:30	-1.97	73	0.75
33	95/ 4/22 15:00	95/ 4/25 07:30	-7.11	494	2.5
34	95/10/25 08:30	95/10/25 15:00	-1.51	32	0
35	95/11/12 14:00	95/11/13 03:30	-7.81	60	1
36	95/11/20 12:00	95/11/23 11:00	-9.04	261	1.5
37	95/12/18 18:00	95/12/19 07:00	-16.86	17	0
38	95/12/22 01:30	95/12/27 16:00	-7.42	46	0
39	96/ 2/22 17:00	96/ 2/28 23:30	-7.43	X	15
40	96/ 3/22 11:00	96/ 3/23 10:30	-6.07	155	0
41	96/ 4/ 4 18:00	96/ 4/ 5 07:00	-7.34	34	0
42	96/10/25 20:30	96/10/26 16:30	-1.53	133	0
43	96/11/11 02:00	96/11/13 07:30	-8.19	286	0.5
44	97/ 3/26 08:00	97/ 3/27 06:30	-7.23	53	0
45	98/ 1/19 00:30	98/ 1/21 11:00	-8.04	84	0
46	98/ 1/24 12:30	98/ 1/25 08:00	-10.44	31	0
47	98/ 1/29 12:00	98/ 1/31 18:30	-7.71	53	0
48	98/ 2/16 14:30	98/ 2/17 06:00	-9.57	34	0
49	98/ 2/20 13:00	98/ 2/21 22:30	-5.92	23	0.25
50	98/ 3/10 07:30	98/ 3/12 06:00	-15.95	9	4.75
51	98/ 3/26 04:30	98/ 3/26 22:00	-2.07	54	0
52	98/ 4/25 14:00	98/ 4/26 05:00	-8.25	34	0

Tableau 56-3: Cas du faisceau de câbles

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
1	91/ 2/ 7 05: 00	91/ 2/ 7 14:30	-2.11	45	0
2	91/11/15 18: 00	91/11/17 21:30	-6.47	220	6.75
3	91/11/24 00: 00	91/11/26 00: 0	-3.99	524	7

X: donnée manquante

(suite à la page suivante)

Tableau 56-3 (suite): Cas du faisceau de câbles

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
4	91/12/22 14:00	91/12/24 05:00	-9.42	209	2
5	92/ 2/26 16:30	92/ 2/27 10:00	-10.01	123	0
6	92/10/23 04:00	92/10/23 12:30	-1.08	27	0
7	92/11/ 5 11:30	92/11/ 7 09:30	-7.00	77	0
8	92/11/22 06:30	92/11/26 12:00	-4.48	185	0.25
9	92/11/27 04:00	92/11/28 11:30	-6.79	271	0
10	92/12/20 00:00	92/12/21 05:30	-9.30	54	5.25
11	92/12/22 16:30	92/12/23 08:30	-8.84	59	0
12	93/ 1/22 13:00	93/ 1/23 21:00	-1.89	135	0.5
13	93/ 3/21 20:00	93/ 3/22 06:00	-6.87	58	0
14	93/ 4/11 15:30	93/ 4/12 07:00	-3.29	78	0
15	93/ 4/17 23:30	93/ 4/19 13:00	-3.67	221	0.25
16	93/ 4/25 23:30	93/ 4/26 08:30	-5.47	94	0
17	93/10/28 01:00	93/10/28 18:00	-2.21	47	1.5
18	93/10/30 00:30	93/11/2 05:30	-5.23	103	1
19	93/11/ 6 09:00	93/11/ 7 11:30	-9.03	231	0.25
20	93/12/20 06:00	93/12/ 21 15:00	-4.87	70	0
21	93/12/22 08:30	93/12/22 17:30	-12.83	29	0.25
22	94/ 2/21 02:30	94/ 2/21 08:30	-6.20	73	0
23	94/ 3/19 22:30	94/ 3/20 06:30	-8.35	76	0
24	94/10/10 04:00	94/10/10 22:30	-1.89	65	0.5
25	94/11/ 7 19:00	94/11/12 11:00	-4.12	424	0.75
26	95/ 1/15 20:30	95/ 1/16 22:00	-3.49	42	3.25
27	95/ 4/15 14:30	95/ 4/16 06:30	-3.45	63	0
28	95/ 4/20 01:30	95/ 4/20 07:30	-1.97	73	0.75
29	95/ 4/22 15:00	95/ 4/25 07:30	-7.11	494	2.5
30	95/10/25 08:30	95/10/25 15:00	-1.51	32	0
31	95/11/ 7 19:00	95/11/10 08:30	-9.54	124	2.25
32	95/11/12 14:00	95/11/13 03:30	-7.81	60	1
33	95/11/20 12:00	95/11/25 08:30	-9.04	261	1.5
34	95/12/18 18:00	95/12/19 07:00	-16.86	17	0
35	95/12/22 01:30	95/12/27 16:00	-7.42	46	0
36	96/ 2/22 17:00	96/ 2/28 23:30	-7.43	X	15
37	96/ 3/22 11:00	96/ 3/23 10:30	-6.07	155	0
38	96/ 4/ 4 18:00	96/ 4/ 5 07:00	-7.34	34	0
39	96/10/25 20:30	96/10/26 16:30	-1.53	133	0
40	96/11/11 02:00	96/11/13 07:30	-8.19	286	0.5
41	96/11/21 22:30	96/11/25 08:00	-12.21	228	0
42	98/ 2/16 14:30	98/ 2/17 05:30	-9.57	34	0
43	98/ 3/26 04:30	98/ 3/26 22:00	-2.07	54	0
44	98/ 4/25 14:00	98/ 4/26 05:00	-8.25	34	0

X: donnée manquante

Tableau 56-4: Cas du câble témoin

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
1	91/ 2/ 7 05: 00	91/ 2/ 7 14: 00	-2.11	45	0
2	91/11/15 18: 00	91/11/17 21:30	-6.47	220	6.75
3	91/11/24 00: 00	91/11/26 00: 0	-3.99	524	7
4	91/12/22 14: 00	91/12/24 05: 0	-9.42	209	2
5	92/10/23 04:00	92/10/23 12:00	-1.08	27	0
6	92/11/ 5 11:30	92/11/ 7 09:00	-7.00	77	0
7	92/11/22 06:30	92/11/26 12:00	-4.48	185	0.25
8	92/11/27 04:00	92/11/28 11:30	-6.79	271	0
9	92/12/20 00:00	92/12/21 04:30	-9.30	54	5.25
10	93/ 1/22 13:00	93/ 1/23 21:00	-1.89	135	0.5
11	93/ 3/21 20:00	93/ 3/22 05:30	-6.87	58	0
12	93/ 4/11 15:30	93/ 4/12 07:00	-3.29	78	0
13	93/ 4/17 23:30	93/ 4/19 13:00	-3.67	221	0.25
14	93/ 4/25 23:30	93/ 4/26 08:30	-5.47	94	0
15	93/10/28 01:00	93/10/28 18:00	-2.21	47	1.5
16	93/10/30 00:30	93/11/01 05:30	-5.23	103	1
17	93/10/24 12:30	93/10/25 02:00	-2.78	97	4.75
18	93/11/ 6 09:00	93/11/ 7 11:30	-9.03	231	0.25
19	93/12/20 06: 00	93/12/21 10:30	-4.87	70	0
20	94/ 3/19 22:30	94/ 3/20 06:30	-8.35	76	0
21	94/10/10 04:00	94/10/10 22:00	-1.89	65	0.5
22	94/11/ 7 19:00	94/11/12 03:00	-4.12	424	0.75
23	95/ 1/18 19:30	95/ 1/20 09:30	-2.73	149	0.75
24	95/ 4/15 14:30	95/ 4/16 06:00	-3.45	63	0
25	95/ 4/20 01:30	95/ 4/20 07:30	-1.97	73	0.75
26	95/ 4/22 15:00	95/ 4/25 07:30	-7.11	494	2.5
27	95/11/ 7 19:00	95/11/10 08:30	-9.54	124	2.25
28	95/11/12 14:00	95/11/13 03:30	-7.81	60	1
29	95/12/18 18:00	95/12/19 07:00	-16.86	17	0
30	95/12/22 01:30	95/12/26 10:30	-7.42	46	0
31	96/ 2/22 17:00	96/ 2/28 23:30	-7.43	X	15
32	96/ 3/22 11:00	96/ 3/23 10:30	-6.07	155	0
33	96/ 4/ 4 18:00	96/ 4/ 5 05:30	-7.34	34	0
34	96/10/25 20:30	96/10/26 16:30	-1.53	133	0
35	96/10/30 15:00	96/11/2 13:00	-4.15	187	13
36	96/11/11 02:00	96/11/13 07:30	-8.19	286	0.5
37	96/11/21 22:30	96/11/24 03:00	-12.21	228	0
38	97/12/13 05:00	97/12/14 05:30	-9.06	146	0
39	97/12/25 13:30	97/12/27 22:30	-9.85	106	0
40	98/ 1/ 2 23:30	98/ 1/ 3 14:30	-2.45	217	0

X: donnée manquante

(suite à la page suivante)



Tableau 56-4 (suite): Cas du câble témoin

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
41	98/ 1/19 00:30	98/ 1/21 11:00	-8.04	84	0
42	98/ 2/16 14:30	98/ 2/17 06:00	-9.57	34	0
43	98/ 3/10 07:30	98/ 3/12 06:00	-15.95	9	4.75
44	98/ 3/26 04:30	98/ 3/26 22:00	-2.07	54	0
45	98/ 4/25 14:00	98/ 4/26 05:00	-8.25	34	0

Tableau 57: Identification des phases d'accrétion dans le cas du verglas

Tableau 57-1: Cas du câble de garde

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
1	91/10/27 04:00	91/10/27 14:00	-1.03	3	X
2	91/11/14 14:00	91/11/15 07:30	-3.46	49	X
3	92/ 1/ 5 00:30	92/ 1/ 5 11:30	-1.00	61	19
4	92/ 3/11 08:00	92/ 3/11 18:00	-0.47	160	7.25
5	92/ 4/ 7 14:00	92/ 4/ 8 06:30	-4.46	105	6
6	92/10/16 13:30	92/10/16 19:30	-0.12	26	16.25
7	92/10/26 15:30	92/10/28 11:30	-3.80	9	5.25
8	92/11/21 14:00	92/11/21 20:30	-2.46	52	9.75
9	93/ 1/ 4 05:00	93/ 1/ 4 21:30	-2.42	244	2.25
10	93/ 5/13 23:00	93/ 5/14 07:00	-0.62	25	0.75
11	93/10/21 07:30	93/10/21 12:30	-0.61	74	13.5
12	93/11/ 3 23:00	93/11/ 4 21:30	-2.56	121	2.75
13	94/ 1/28 09:30	94/ 1/29 00:00	-4.51	69	12.75
14	94/10/ 2 16:30	94/10/ 3 03:00	-0.61	116	X
15	94/10/ 5 12:30	94/10/ 6 11:30	-1.11	94	0.25
16	94/10/25 21:00	94/10/26 10:30	-0.30	33	0
17	94/11/ 6 10:00	94/11/ 6 18:30	-0.71	43	9
18	94/11/21 17:30	94/11/21 20:00	-1.57	2	1.75
19	95/ 1/14 01:30	95/ 1/14 11:00	-3.01	24	10.5
20	95/ 3/ 7 21:30	95/ 3/ 8 03:30	-3.95	28	18.5
21	95/ 4/12 13:00	95/ 4/12 23:00	-0.85	23	9.75
22	95/10/16 05:30	95/10/17 09:30	-2.11	340	2.75
23	95/10/29 08:00	95/10/29 12:00	-0.41	46	0.25
24	95/11/ 2 11:30	95/11/ 3 05:00	-2.37	30	15.25
25	96/ 1/17 07:00	96/ 1/17 15:00	-2.57	63	4
26	96/ 4/16 02:00	96/ 4/17 04:30	-1.91	66	12
27	96/ 4/25 23:00	96/ 4/26 04:30	-1.40	35	6.5
28	96/10/ 3 01:00	96/10/ 3 12:30	-1.76	131	2.75
29	96/10/14 05:30	96/10/14 14:30	-2.21	138	2.25
30	96/12/ 2 12:00	96/12/ 3 6:30	-2.35	320	5
31	97/ 4/28 13:00	97/ 4/28 21:00	-1.06	50	0.75
32	97/ 5/ 2 05:00	97/ 5/ 2 13:00	-2.34	95	1
33	97/ 5/ 6 22:00	97/ 5/ 7 14:30	-0.89	64	2.5
34	97/ 5/10 18:30	97/ 5/11 7:00	-0.81	101	0
35	97/ 5/16 13:00	97/ 5/17 11:00	-1.56	174	21.5
36	97/ 5/17 12:30	97/ 5/18 08:30	-1.65	X	2.75
37	97/10/21 02:30	97/10/21 12:30	-1.90	113	0.25
38	98/ 3/ 9 02:00	98/ 3/ 9 19:00	-3.79	97	7.25
39	98/ 4/18 11:30	98/ 4/19 07:00	-2.95	285	0

X: donnée manquante

Tableau 57-2: Cas du câble Bersimis

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
1	86/11/24 12:30	86/11/25 01:30	-6.24	81	X
2	86/11/ 6 18:30	86/11/ 8 08: 00	-1.46	127	X
3	88/ 3/27 17:30	88/ 3/28 11: 00	-3.52	73	X
4	91/10/27 04:00	91/10/27 14: 00	-1.03	3	X
5	91/11/14 14:00	91/11/15 07:30	-3.46	49	X
6	92/ 1/ 5 00:30	92/ 1/ 5 11:30	-1.00	61	19
7	92/ 3/11 08:00	92/ 3/11 18: 00	-0.47	160	7.25
8	92/ 4/ 7 14:00	92/ 4/ 8 06:30	-4.46	105	6
9	92/10/16 13:30	92/10/16 19:30	-0.12	26	16.25
10	92/11/21 14:00	92/11/21 20:30	-2.46	52	9.75
11	93/ 1/ 4 05:00	93/ 1/ 4 21:30	-2.42	244	2.25
12	93/ 5/13 23:00	93/ 5/14 07:00	-0.62	25	0.75
13	93/10/21 07:30	93/10/21 12:30	-0.61	74	13.5
14	93/11/ 3 23:00	93/11/ 4 21:00	-2.56	121	2.75
15	94/ 1/28 09:30	94/ 1/29 00:30	-4.51	69	12.75
16	94/10/ 2 16:30	94/10/ 3 03:30	-0.61	116	X
17	94/10/25 21:00	94/10/26 10:30	-0.30	33	0
18	94/11/ 6 10:00	94/11/ 6 18:30	-0.71	43	9
19	94/11/21 17:30	94/11/21 20:00	-1.57	2	1.75
20	95/ 3/ 7 21:30	95/ 3/ 8 03:30	-3.95	28	18.5
21	95/ 4/12 13:00	95/ 4/12 23:00	-0.85	23	9.75
22	95/10/16 05:30	95/10/17 09:30	-2.11	340	2.75
23	95/10/29 08:00	95/10/29 12:00	-0.41	46	0.25
24	95/11/ 2 11:30	95/11/ 3 05:00	-2.37	30	15.25
25	96/ 4/16 02:00	96/ 4/17 04:30	-1.91	66	12
26	96/ 4/25 23:00	96/ 4/26 04:30	-1.40	35	6.5
27	96/10/ 3 01:00	96/10/ 3 12:30	-1.76	131	2.75
28	96/10/14 05:30	96/10/14 14:30	-2.21	138	2.25
29	96/12/ 2 12:00	96/12/ 3 6:30	-2.35	320	5
30	97/ 4/28 13:00	97/ 4/28 21:00	-1.06	50	0.75
31	97/ 5/ 2 05:00	97/ 5/ 2 13:00	-2.34	95	1
32	97/ 5/ 6 22:00	97/ 5/ 7 14:00	-0.89	64	2.5
33	97/ 5/10 18:30	97/ 5/11 7:00	-0.81	101	0
34	97/ 5/16 13:00	97/ 5/17 11:00	-1.56	174	21.5
35	97/ 5/17 12:30	97/ 5/18 08:00	-1.65	X	2.75
36	97/10/21 02:30	97/10/21 11:30	-1.90	113	0.25
37	98/ 3/ 9 02:00	98/ 3/ 9 19:00	-3.79	97	7.25
38	98/ 4/18 11:30	98/ 4/19 06:30	-2.95	285	0

X: donnée manquante

Tableau 57-3: Cas du faisceau de câbles

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
1	91/10/27 04:00	91/10/27 14:00	-4.46	105	6
2	91/11/14 14:00	91/11/15 07:30	-2.35	320	5
3	92/ 1/ 5 00:30	92/ 1/ 5 11:30	-1.00	61	19
4	92/ 3/11 08:00	92/ 3/11 18:00	-0.47	160	7.25
5	92/ 4/ 7 14:00	92/ 4/ 8 06:30	-4.46	105	6
6	92/10/16 14:00	92/10/16 19:30	-0.08	25	14.5
7	92/10/26 15:30	92/10/28 11:30	-3.80	9	5.25
8	92/11/21 14:00	92/11/21 20:30	-2.46	52	9.75
9	93/ 1/ 4 05:00	93/ 1/ 4 21:30	-2.42	244	2.25
10	93/ 4/20 20:00	93/ 4/21 11:30	-1.98	60	1.25
11	93/ 5/13 23:00	93/ 5/14 07:00	-0.62	25	0.75
12	93/10/21 07:30	93/10/21 12:30	-0.61	74	13.5
13	93/11/ 3 23:00	93/11/ 4 21:00	-2.56	121	2.75
14	94/ 1/28 09:30	94/ 1/28 23:30	-4.51	69	12.75
15	94/10/ 2 16:30	94/10/ 3 03:30	-0.61	116	X
16	94/10/25 21:00	94/10/26 10:30	-0.71	43	9
17	94/11/ 6 10:00	94/11/ 6 18:30	-1.57	2	1.75
18	94/11/21 17:30	94/11/21 20:00	-3.95	28	18.5
19	95/ 3/ 7 21:30	95/ 3/ 8 03:30	-0.85	23	9.75
20	95/ 4/12 13:00	95/ 4/12 23:00	-2.11	340	2.75
21	95/10/16 05:30	95/10/17 09:30	-2.37	30	15.25
22	95/10/29 08:00	95/10/29 12:00	-1.91	66	12
23	95/11/ 2 11:30	95/11/ 3 04:30	-1.40	35	6.5
24	96/ 4/16 02:00	96/ 4/17 04:30	-1.76	131	2.75
25	96/ 4/25 23:00	96/ 4/26 04:30	-2.21	138	2.25
26	96/10/ 3 01:00	96/10/ 3 10:30	-1.06	50	0.75
27	96/10/14 05:30	96/10/14 14:30	-2.34	95	1
28	97/ 4/28 13:00	97/ 4/28 21:00	-1.56	174	21.5
29	97/ 5/ 2 05:00	97/ 5/ 2 13:00	-1.65	X	2.75
30	97/ 5/ 6 22:00	97/ 5/ 7 14:00	-1.90	113	0.25
31	97/ 5/10 18:30	97/ 5/11 07:00	-3.79	97	7.25
32	97/ 5/16 13:00	97/ 5/17 10:30	-2.95	285	0
33	97/ 5/17 12:30	97/ 5/18 07:00	-1.03	3	X
34	97/10/21 02:30	97/10/21 11:30	-3.46	49	X
35	98/ 3/ 9 02:00	98/ 3/ 9 19:00	-1.00	61	19
36	98/ 4/18 11:30	98/ 4/19 07:00	-0.47	160	7.25

X: donnée manquante

Tableau 57-4: Cas du câble témoin

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
1	91/10/27 04: 00	91/10/27 14: 00	-1.03	3	X
2	92/ 1/ 5 00:30	92/ 1/ 5 11:30	-1.00	61	19
3	92/ 3/11 08:00	92/ 3/11 18: 00	-0.47	160	7.25
4	92/ 4/ 7 14:00	92/ 4/ 8 06:30	-4.46	105	6
5	92/10/16 14:00	92/10/16 19:30	-0.08	25	14.5
6	92/10/26 15:30	92/10/28 11:30	-3.80	9	5.25
7	92/11/21 14:00	92/11/21 20:30	-2.46	52	9.75
8	93/ 1/ 4 05:00	93/ 1/ 4 21:30	-2.42	244	2.25
9	93/ 5/13 23:00	93/ 5/14 07:00	-0.62	25	0.75
10	93/10/21 07:30	93/10/21 12:30	-0.61	74	13.5
11	93/11/ 3 23:00	93/11/ 4 18:00	-2.56	121	2.75
12	94/ 1/28 09:30	94/ 1/29 00:30	-4.51	69	12.75
13	94/10/ 2 16:30	94/10/ 3 03:30	-0.61	116	X
14	94/10/25 21:00	94/10/26 10:30	-0.30	33	0
15	94/11/ 6 10:00	94/11/ 6 18:30	-0.71	43	9
16	94/11/21 17:30	94/11/21 20:00	-1.57	2	1.75
17	95/ 3/ 7 21:30	95/ 3/ 8 03:30	-3.95	28	18.5
18	95/ 4/12 13:00	95/ 4/12 23:00	-0.85	23	9.75
19	95/10/16 05:30	95/10/17 09:30	-2.11	340	2.75
20	95/11/ 2 11:30	95/11/ 3 02:30	-2.37	30	15.25
21	96/ 1/17 07:00	96/ 1/17 15:00	-2.57	63	4
22	96/ 4/16 02:00	96/ 4/17 04:30	-1.91	66	12
23	96/ 4/25 23:00	96/ 4/26 04:30	-1.40	35	6.5
24	96/10/ 3 01:00	96/10/ 3 12:00	-1.76	131	2.75
25	96/10/14 05:30	96/10/14 14:30	-2.21	138	2.25
26	96/12/ 2 12:00	96/12/ 3 06:30	-2.35	320	5
27	97/ 5/ 2 05:00	97/ 5/ 2 13:00	-2.34	95	1
28	97/ 5/ 6 22:00	97/ 5/ 7 14:00	-0.89	64	2.5
29	97/ 5/17 12:30	97/ 5/18 08:30	-1.65	X	2.75
30	97/10/21 02:30	97/10/21 11:30	-1.90	113	0.25
31	98/ 3/ 9 02:00	98/ 3/ 9 19:00	-3.79	97	7.25
32	98/ 4/18 11:30	98/ 4/19 07:00	-2.95	285	0

X: donnée manquante

Tableau 58: Identification des phases d'accrétion dans le cas de la neige mouillée

Tableau 58-1: Cas du câble de garde

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
1	92/ 4/22 09:00	92/ 4/22 21:30	0.10	83	24
2	94/ 4/14 16:00	94/ 4/14 17:30	0.30	10	1
3	95/ 3/22 05:30	95/ 3/22 11:30	0.09	19	8.25
4	95/ 4/19 10:00	95/ 4/19 14:30	0.78	18	4.25
5	96/10/13 00:30	96/10/13 12:00	0.15	58	1.25

Tableau 58-2: Cas du câble Bersimis

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
1	92/ 4/22 09:00	92/ 4/22 21:30	0.10	83	24
2	93/ 4/25 07:30	93/ 4/25 09:30	0.08	15	1.75
3	94/ 4/14 16:00	94/ 4/14 17:30	0.30	10	1
4	95/ 3/22 05:30	95/ 3/22 11:30	0.09	19	8.25
5	95/ 4/19 10:00	95/ 4/19 14:30	0.78	18	4.25
6	96/ 4/24 01:30	96/ 4/24 04:00	0.10	1	2.25
7	96/10/13 00:30	96/10/13 11:30	0.15	58	1.25

Tableau 58-3: Cas du faisceau de câbles

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
1	92/ 4/22 09:00	92/ 4/22 21:30	0.10	83	24
2	93/ 4/25 07:30	93/ 4/25 09:30	0.08	15	1.75
3	94/ 4/14 16:00	94/ 4/14 17:30	0.30	10	1
4	95/ 3/22 05:30	95/ 3/22 11:30	0.09	19	8.25
5	95/ 4/19 10:00	95/ 4/19 14:30	0.78	18	4.25
6	96/ 4/24 01:30	96/ 4/24 04:00	0.10	1	2.25
7	96/10/13 00:30	96/10/13 11:30	0.15	58	1.25

Tableau 58-4: Cas du câble témoin

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
1	92/ 4/22 09:00	92/ 4/22 21:30	0.10	83	24
2	96/10/13 00:30	96/10/13 11:00	0.15	58	1.25

Tableau 59: Identification des phases d'accrétion dans le cas des mélanges

Tableau 59-1: Cas du câble de garde

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
1	87/11/ 5 13: 00	87/11/ 6 19:30	-8.06	77	X
2	87/12/ 1 00: 00	87/12/ 1 09:30	-9.57	X	X
3	91/ 2/19 19:30	91/ 2/20 12: 00	-2.38	132	X
4	91/11/24 00: 00	91/11/27 17:30	-8.03	563	7
5	93/12/ 3 02: 00	93/12/ 6 21:30	-4.58	246	1.75
6	94/ 3/22 08:00	94/ 3/23 05:00	-3.32	109	4.75
7	94/ 3/25 02:00	94/ 3/25 20:00	-4.01	94	3.25
8	94/11/ 1 13:30	94/11/ 3 11:30	-1.23	85	18.5
9	94/11/28 22:30	94/11/30 23:30	-10.32	64	2
10	96/10/30 19:30	96/11/ 2 11:00	-4.23	165	7.75
11	97/ 5/11 15:00	97/ 5/12 07:00	-1.30	138	2.25
12	97/11/ 9 20:00	97/11/12 11:30	-4.79	45	6.5
13	97/ 5/ 4 04:30	97/ 5/ 4 17:00	-1.23	77	6.25
14	98/ 2/12 05:00	98/ 2/13 03:30	-3.84	64	6

Tableau 59-2: Cas du câble Bersimis

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
1	87/12/ 1 00: 00	87/12/ 1 09:30	-9.57	X	X
2	91/ 2/19 19:30	91/ 2/20 12: 00	-2.38	132	X
3	91/11/24 00: 00	91/11/27 17:30	-8.03	563	7
4	93/12/ 3 02: 00	93/12/ 6 21:30	-4.58	246	1.75
5	94/ 3/22 08:00	94/ 3/23 05:00	-3.32	109	4.75
6	94/11/ 1 13:30	94/11/ 3 11:00	-1.23	85	18.5
7	94/11/28 22:30	94/11/30 23:30	-10.32	64	2
8	96/10/30 19:30	96/11/ 2 11:00	-4.23	165	7.75
9	97/ 5/ 4 04:30	97/ 5/ 4 17:00	-1.23	77	6.25
10	97/ 5/11 15:00	97/ 5/12 07:00	-1.30	138	2.25
11	97/11/ 9 20:00	97/11/12 11:30	-4.79	45	6.5
12	98/ 2/12 05:00	98/ 2/13 04:00	-3.84	64	6

X: donnée manquante

Tableau 59-3: Cas du faisceau de câbles

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
1	91/ 2/19 19:30	91/ 2/20 12: 00	-2.38	132	X
2	91/11/24 00: 00	91/11/27 17:30	-8.03	563	7
3	93/10/ 8 23:30	93/10/11 09:00	-6.00	48	12.5
4	93/10/22 04:00	93/10/23 07:00	-2.28	292	3.75
5	93/12/ 3 02: 00	93/12/ 6 21:30	-4.58	246	1.75
6	94/ 3/22 08:00	94/ 3/23 04:30	-3.32	109	4.75
7	94/ 3/25 02:00	94/ 3/25 20:00	-4.01	94	3.25
8	94/11/ 1 13:30	94/11/ 3 11:00	-1.23	85	18.5
9	94/11/28 22:30	94/11/30 23:30	-10.32	64	2
10	96/10/30 19:30	96/11/ 2 11:00	-4.23	165	7.75
11	97/ 5/11 15:00	97/ 5/12 06:00	-1.30	138	2.25
12	97/11/ 9 20:00	97/11/12 08:30	-4.79	45	6.5
13	98/ 2/12 05:00	98/ 2/13 04:00	-3.84	64	6

Tableau 59-4: Cas du câble témoin

No.	début	fin	température moyenne	nombre d'alarmes	précipitations en mm
1	91/ 2/19 19:30	91/ 2/20 12: 00	-2.38	132	X
3	91/11/24 00: 00	91/11/27 17: 00	-8.03	563	7
2	92/11/10 23:30	92/11/12 08:30	-3.02	187	6.25
4	93/10/ 8 23:30	93/10/11 09:00	-6.00	48	12.5
5	93/12/ 3 02: 00	93/12/ 6 21: 00	-4.58	246	1.75
6	94/ 3/22 08:00	94/ 3/23 05:00	-3.32	109	4.75
7	94/ 3/25 02:00	94/ 3/25 20:00	-4.01	94	3.25
8	94/11/ 1 13:30	94/11/ 3 11:30	-1.23	85	18.5
9	94/11/28 22:30	94/11/30 23:30	-10.32	64	2
10	96/10/30 19:30	96/11/ 2 11:00	-4.23	165	7.75
11	97/ 5/11 15:00	97/ 5/12 07:00	-1.30	138	2.25
12	97/11/ 9 20:00	97/11/12 11:30	-4.79	45	6.5
13	98/ 2/12 05:00	98/ 2/13 04:00	-3.84	64	6

X: donnée manquante



## **ANNEXE B**

Tableau 60: Fichiers de travail de la base de données de l'accrétion

Tableau 60-1: Cas du givre

nom du fichier	extension	description
ACCRGIV1	XLS	sélection des phases d'accrétion et des paramètres mesurés
ACCRGIV2	XLS	sélection des phases d'accrétion et des paramètres mesurés (suite)
ACCRGIVG	XLS	câble de garde: calculs des taux d'accrétion moyens et des variables indépendantes pour chaque phase d'accrétion
ACCRGIVB	XLS	câble Bersimis: calculs des taux d'accrétion moyens et des variables indépendantes pour chaque phase d'accrétion
ACCRGIVF	XLS	un câble du faisceau: calculs des taux d'accrétion moyens et des variables indépendantes pour chaque phase d'accrétion
ACCRGIVT	XLS	câble témoin: calculs des taux d'accrétion moyens et des variables indépendantes pour chaque phase d'accrétion
ACCRGIVG	WST	câble de garde: base de données des phases d'accrétion utilisée pour l'analyse statistique
ACCRGIVB	WST	câble Bersimis: base de données des phases d'accrétion utilisée pour l'analyse statistique
ACCRGIVF	WST	un câble du faisceau: base de données des phases d'accrétion utilisée pour l'analyse statistique
ACCRGIVT	WST	câble témoin: base de données des phases d'accrétion utilisée pour l'analyse statistique

Tableau 60-2: Cas du verglas

nom du fichier	extension	description
ACCRVER	XLS	sélection des phases d'accrétion et des paramètres mesurés
ACCRVERG	XLS	câble de garde: calculs des taux d'accrétion moyens et des variables indépendantes pour chaque phase d'accrétion
ACCRVERB	XLS	câble Bersimis: calculs des taux d'accrétion moyens et des variables indépendantes pour chaque phase d'accrétion
ACCRVERF	XLS	un câble du faisceau: calculs des taux d'accrétion moyens et des variables indépendantes pour chaque phase d'accrétion
ACCRVERT	XLS	câble témoin: calculs des taux d'accrétion moyens et des variables indépendantes pour chaque phase d'accrétion
ACCRVERG	WST	câble de garde: base de données des phases d'accrétion utilisée pour l'analyse statistique
ACCRVERB	WST	câble Bersimis: base de données des phases d'accrétion utilisée pour l'analyse statistique
ACCRVERF	WST	un câble du faisceau: base de données des phases d'accrétion utilisée pour l'analyse statistique
ACCRVERT	WST	câble témoin: base de données des phases d'accrétion utilisée pour l'analyse statistique

Tableau 60-3: Cas de la neige mouillée

<b>nom du fichier</b>	<b>extension</b>	<b>description</b>
<b>ACCRNM</b>	<b>XLS</b>	sélection des phases d'accrétion et des paramètres mesurés
<b>ACCRNMG</b>	<b>XLS</b>	câble de garde: calculs des taux d'accrétion moyens et des variables indépendantes pour chaque phase d'accrétion
<b>ACCRNMB</b>	<b>XLS</b>	câble Bersimis: calculs des taux d'accrétion moyens et des variables indépendantes pour chaque phase d'accrétion
<b>ACCRNMF</b>	<b>XLS</b>	un câble du faisceau: calculs des taux d'accrétion moyens et des variables indépendantes pour chaque phase d'accrétion
<b>ACCRNMT</b>	<b>XLS</b>	câble témoin: calculs des taux d'accrétion moyens et des variables indépendantes pour chaque phase d'accrétion
<b>ACCRNMG</b>	<b>WST</b>	câble de garde: base de données des phases d'accrétion utilisée pour l'analyse statistique
<b>ACCRNMB</b>	<b>WST</b>	câble Bersimis: base de données des phases d'accrétion utilisée pour l'analyse statistique
<b>ACCRNMF</b>	<b>WST</b>	un câble du faisceau: base de données des phases d'accrétion utilisée pour l'analyse statistique
<b>ACCRNMT</b>	<b>WST</b>	câble témoin: base de données des phases d'accrétion utilisée pour l'analyse statistique

Tableau 60-4 Cas des mélanges

nom du fichier	extension	description
ACCRMEL	XLS	sélection des phases d'accrétion et des paramètres mesurés
ACCRMELG	XLS	câble de garde: calculs des taux d'accrétion moyens et des variables indépendantes pour chaque phase d'accrétion
ACCRMELB	XLS	câble Bersimis: calculs des taux d'accrétion moyens et des variables indépendantes pour chaque phase d'accrétion
ACCRMELF	XLS	un câble du faisceau: calculs des taux d'accrétion moyens et des variables indépendantes pour chaque phase d'accrétion
ACCRMELT	XLS	câble témoin: calculs des taux d'accrétion moyens et des variables indépendantes pour chaque phase d'accrétion
ACCRMELG	WST	câble de garde: base de données des phases d'accrétion utilisée pour l'analyse statistique
ACCRMELB	WST	câble Bersimis: base de données des phases d'accrétion utilisée pour l'analyse statistique
ACCRMELF	WST	un câble du faisceau: base de données des phases d'accrétion utilisée pour l'analyse statistique
ACCRMELT	WST	câble témoin: base de données des phases d'accrétion utilisée pour l'analyse statistique

## **ANNEXE C**

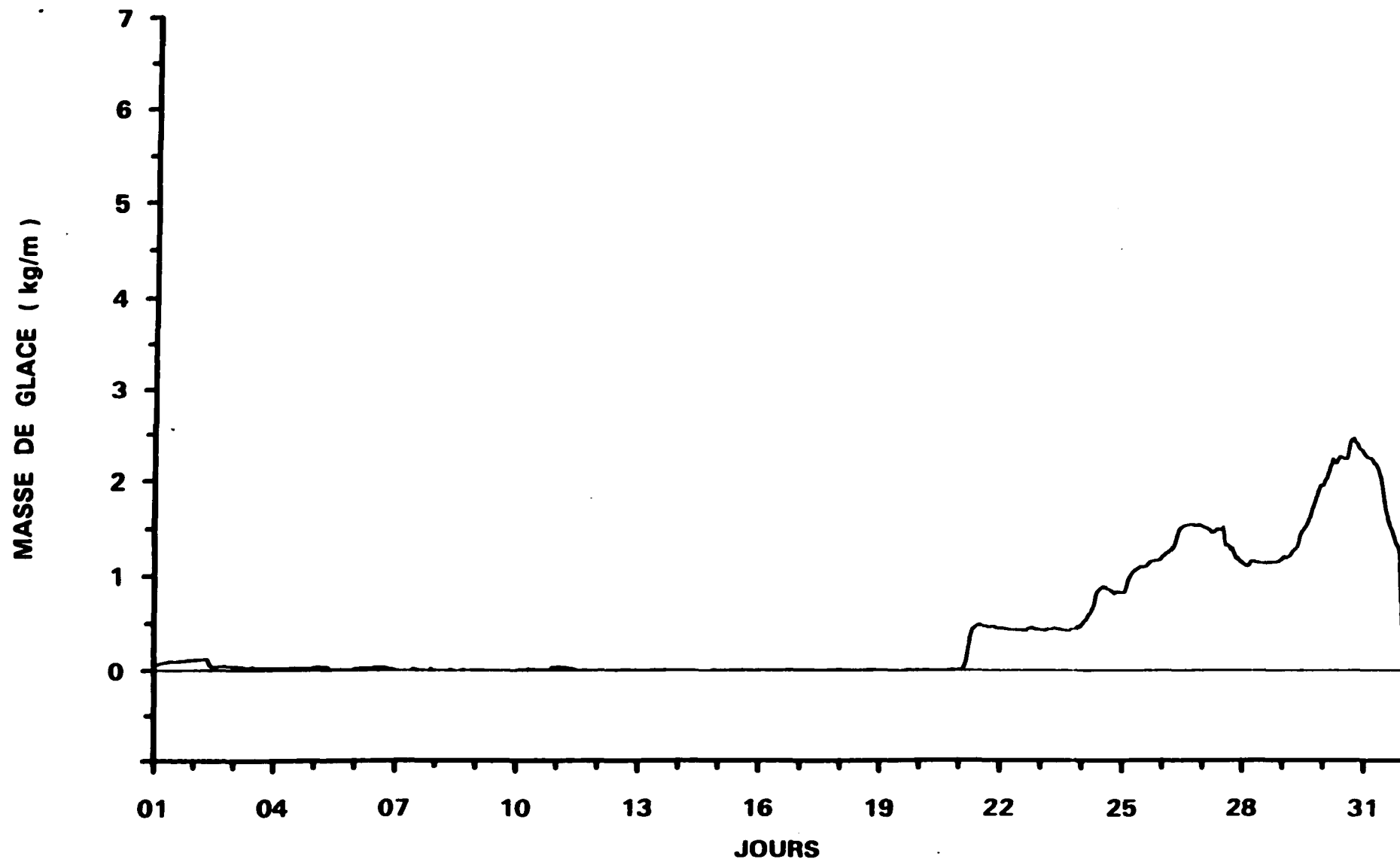
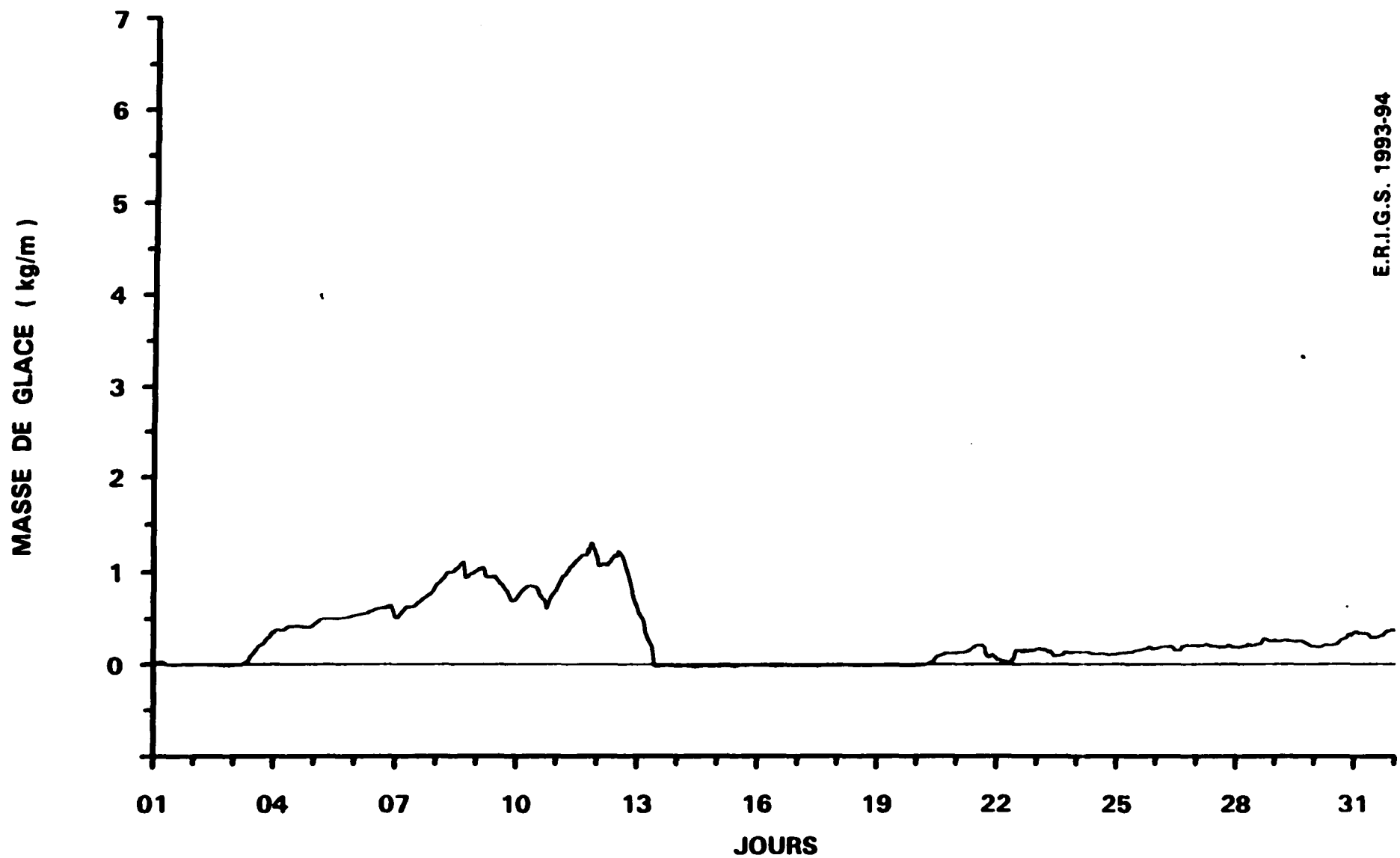


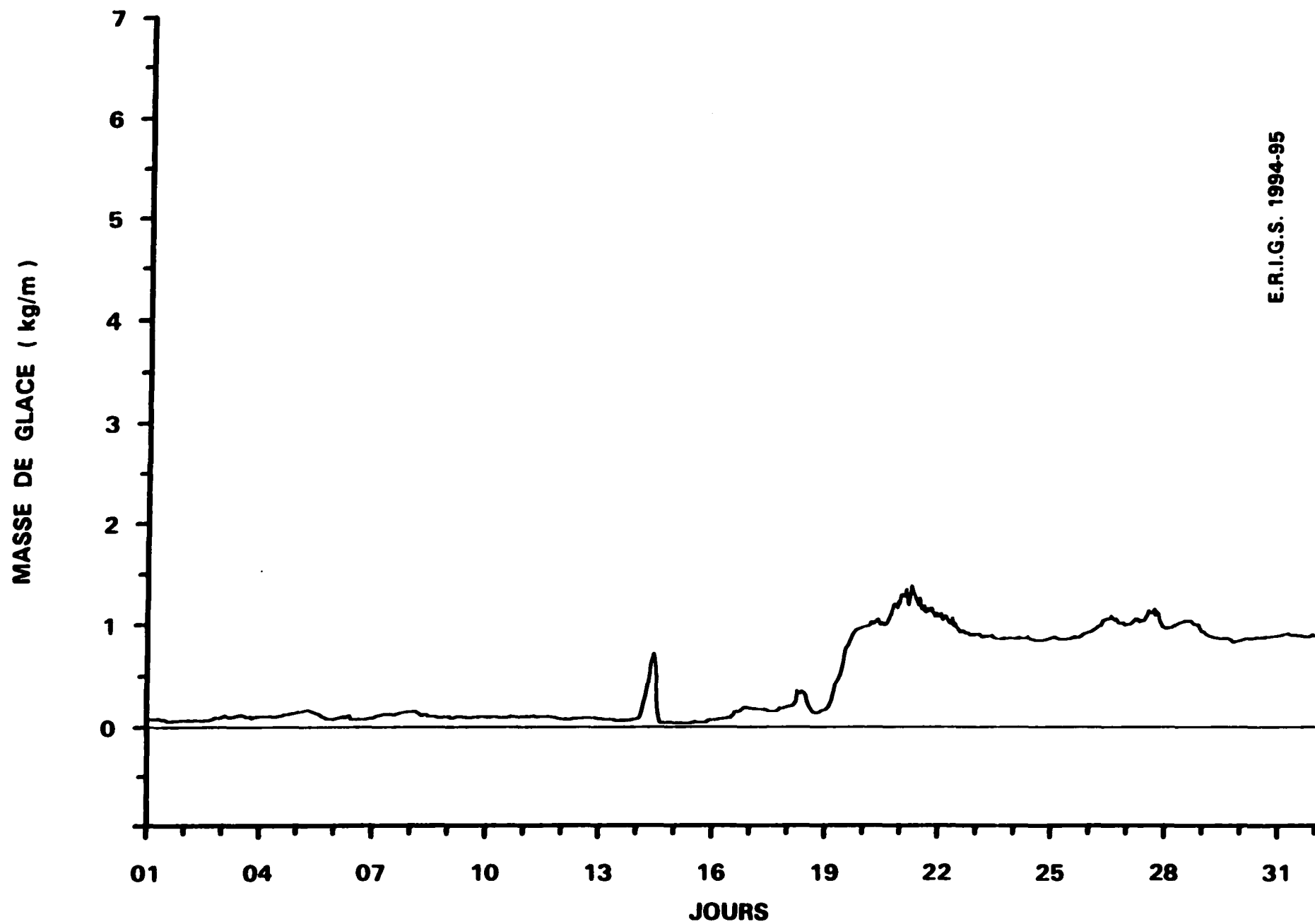
Figure 1: Complexité des phases d'un événement, le 21 octobre 1997 (câble de garde)



E.R.I.G.S. 1993-94

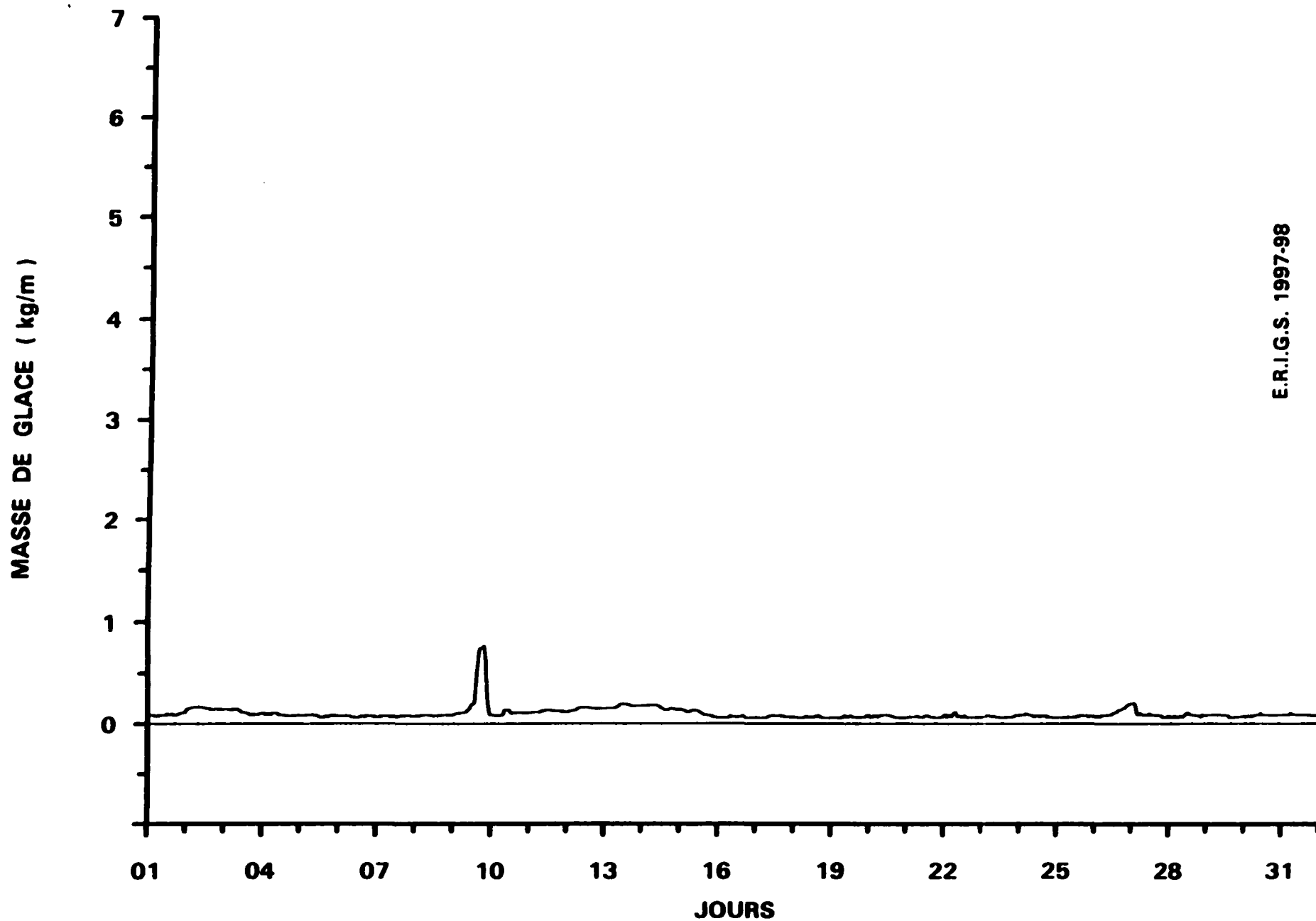
Figure 2: Complexité des phases d'un événement, le 3 décembre 1993 (câble de garde)





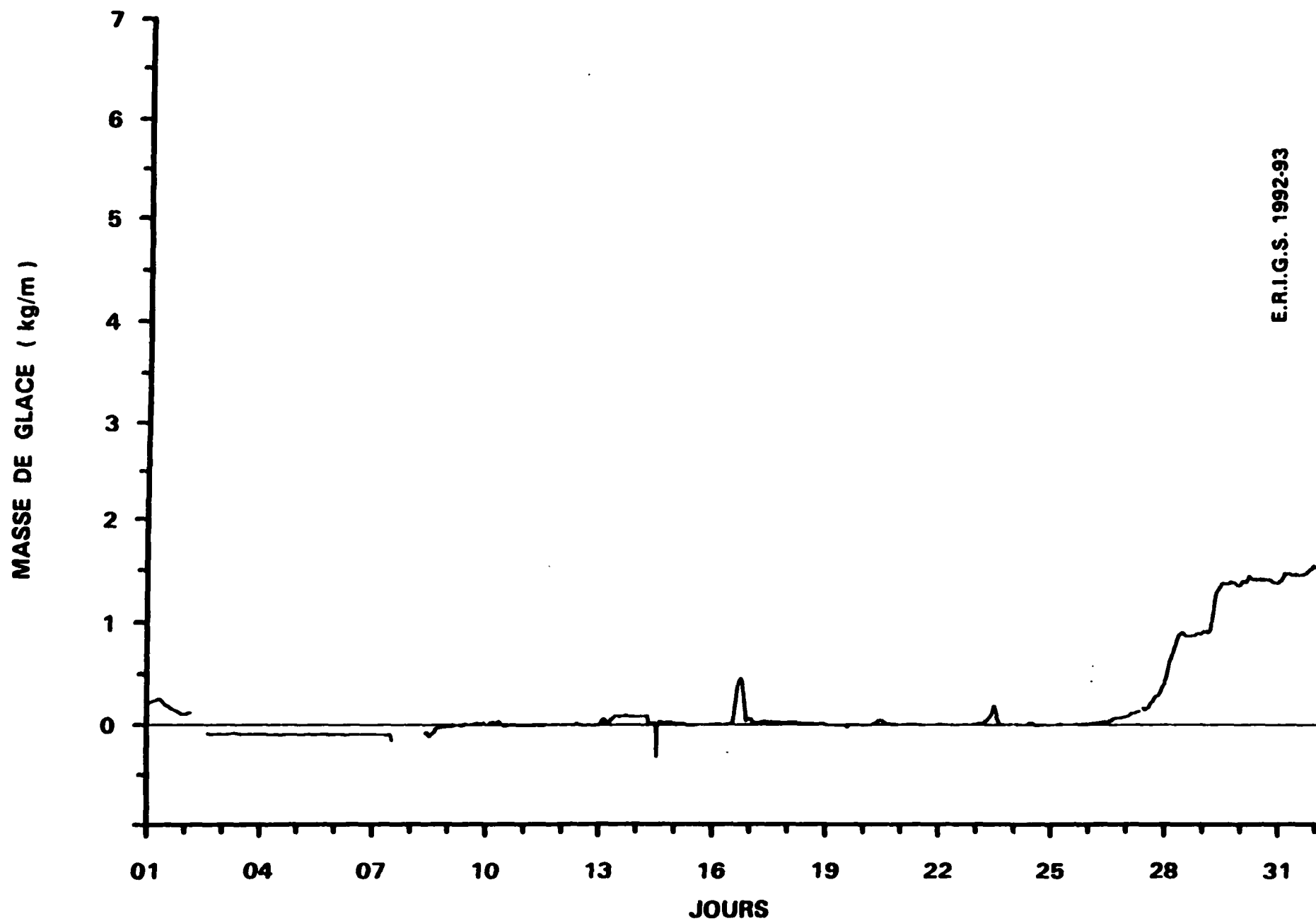
E.R.I.G.S. 1994-95

Figure 3: Événement de verglas, le 14 janvier 1995 (câble de garde)



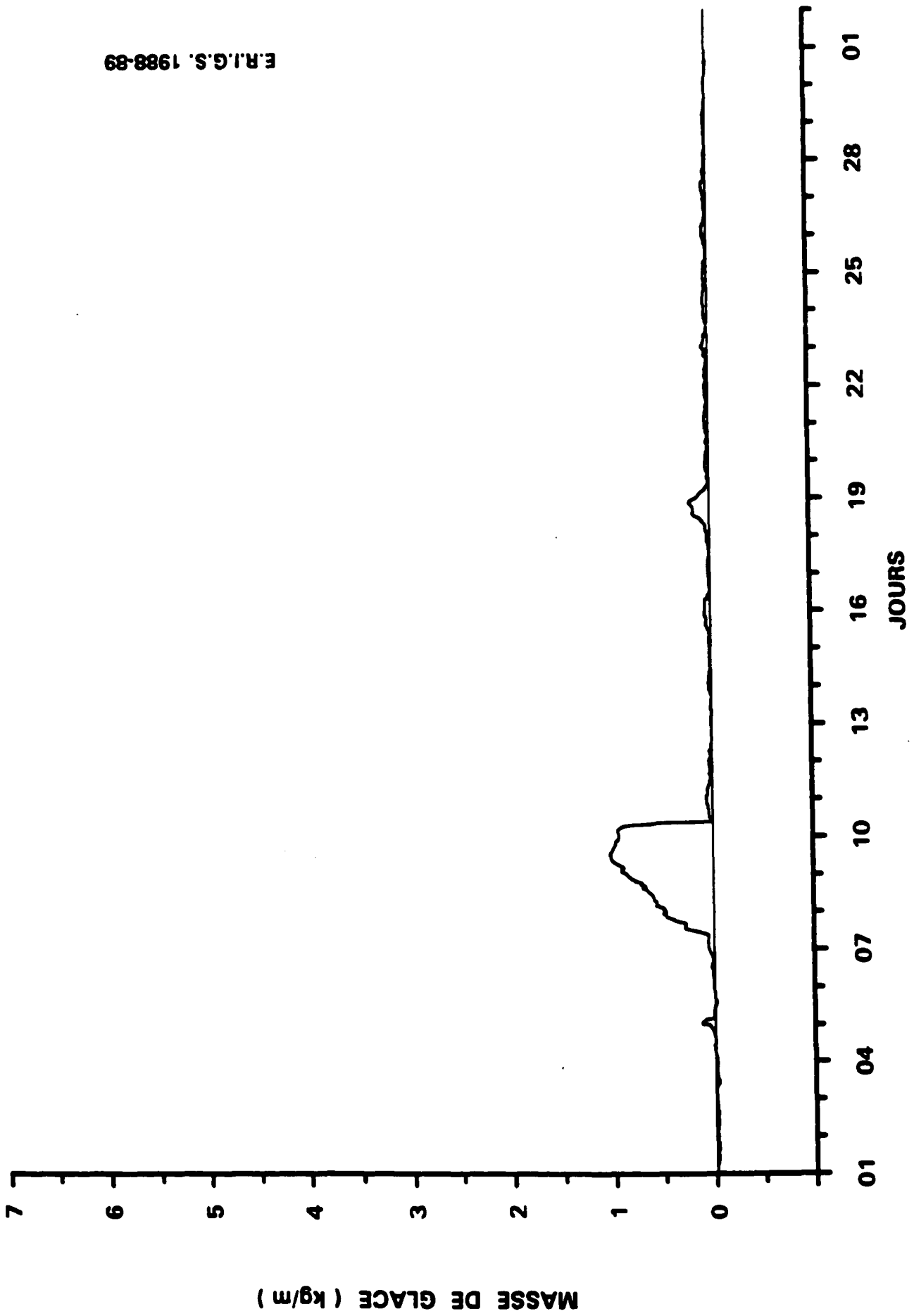
E.R.I.G.S. 1997-98

Figure 4: Événement de verglas, le 9 mars 1998 (un câble du faisceau)



E.R.I.G.S. 1992-93

Figure 5: Événement de verglas, le 16 octobre 1992 (câble de garde)



E.R.I.G.S. 1988-89

Figure 6: Événement de givre, le 7 avril 1989 (câble de garde)

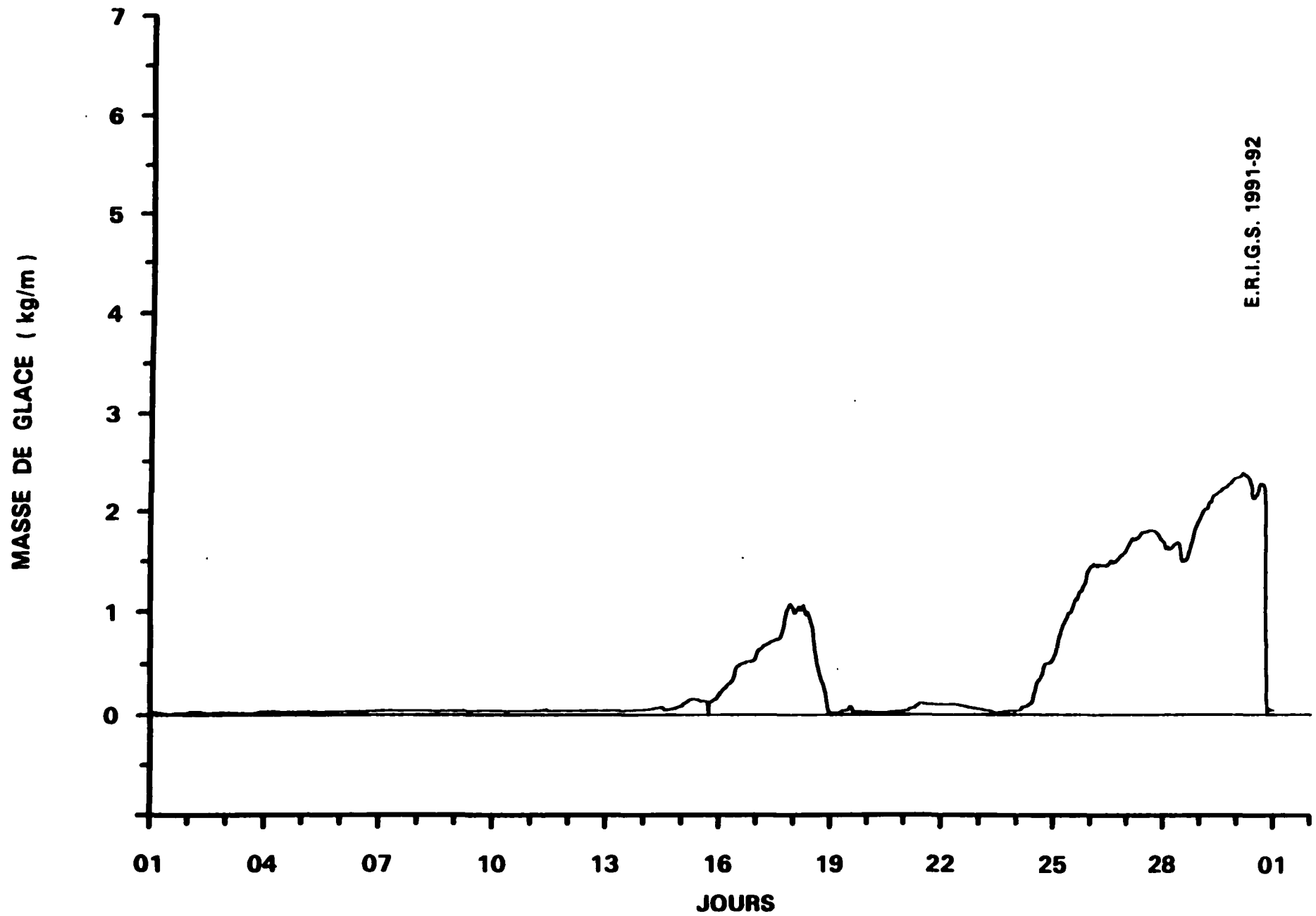
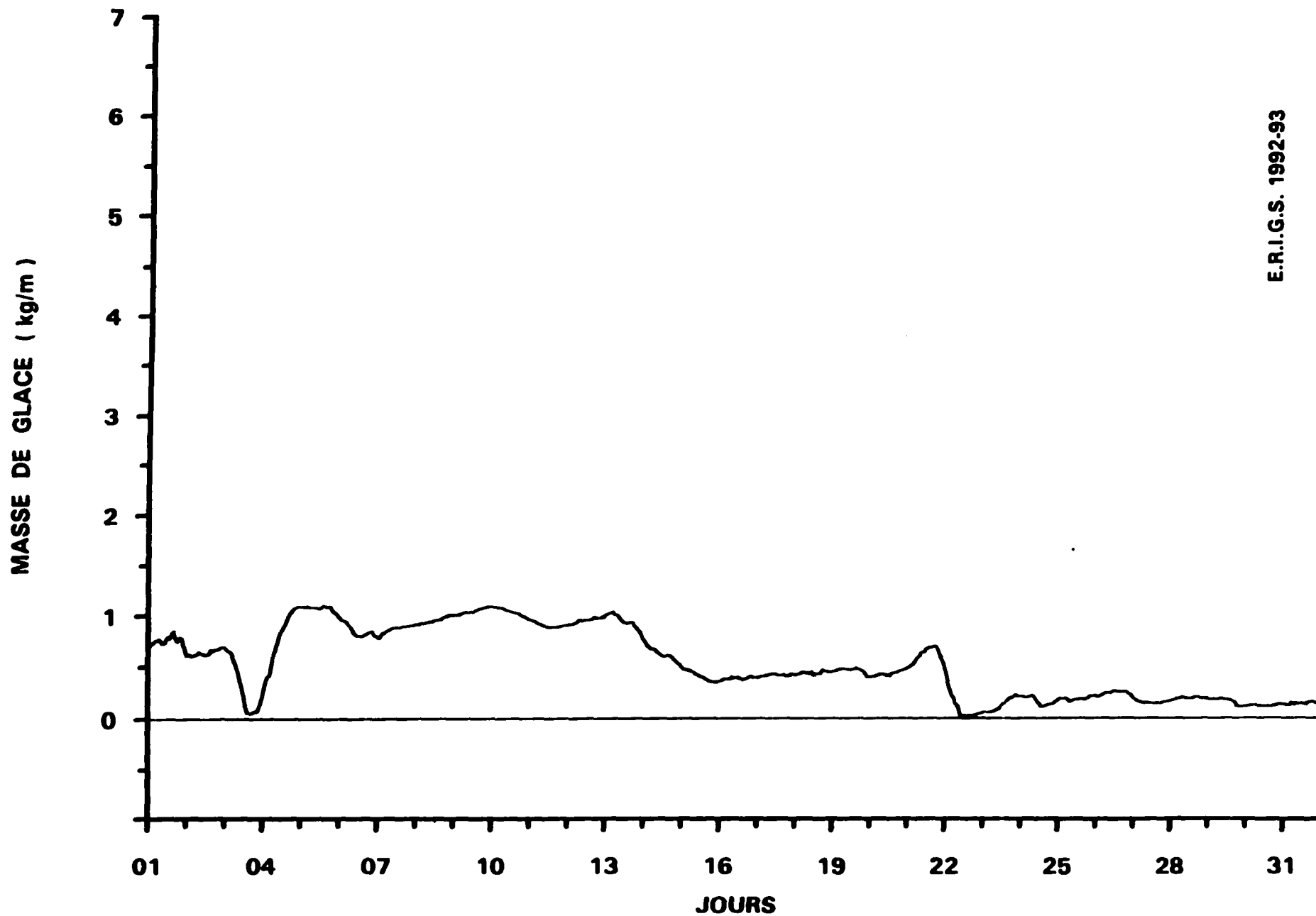


Figure 7: Événement de givre, le 24 novembre 1991 (câble de garde)



E.R.I.G.S. 1992-93

Figure 8: Événement de givre, le 4 janvier 1993 (câble Bersimis)

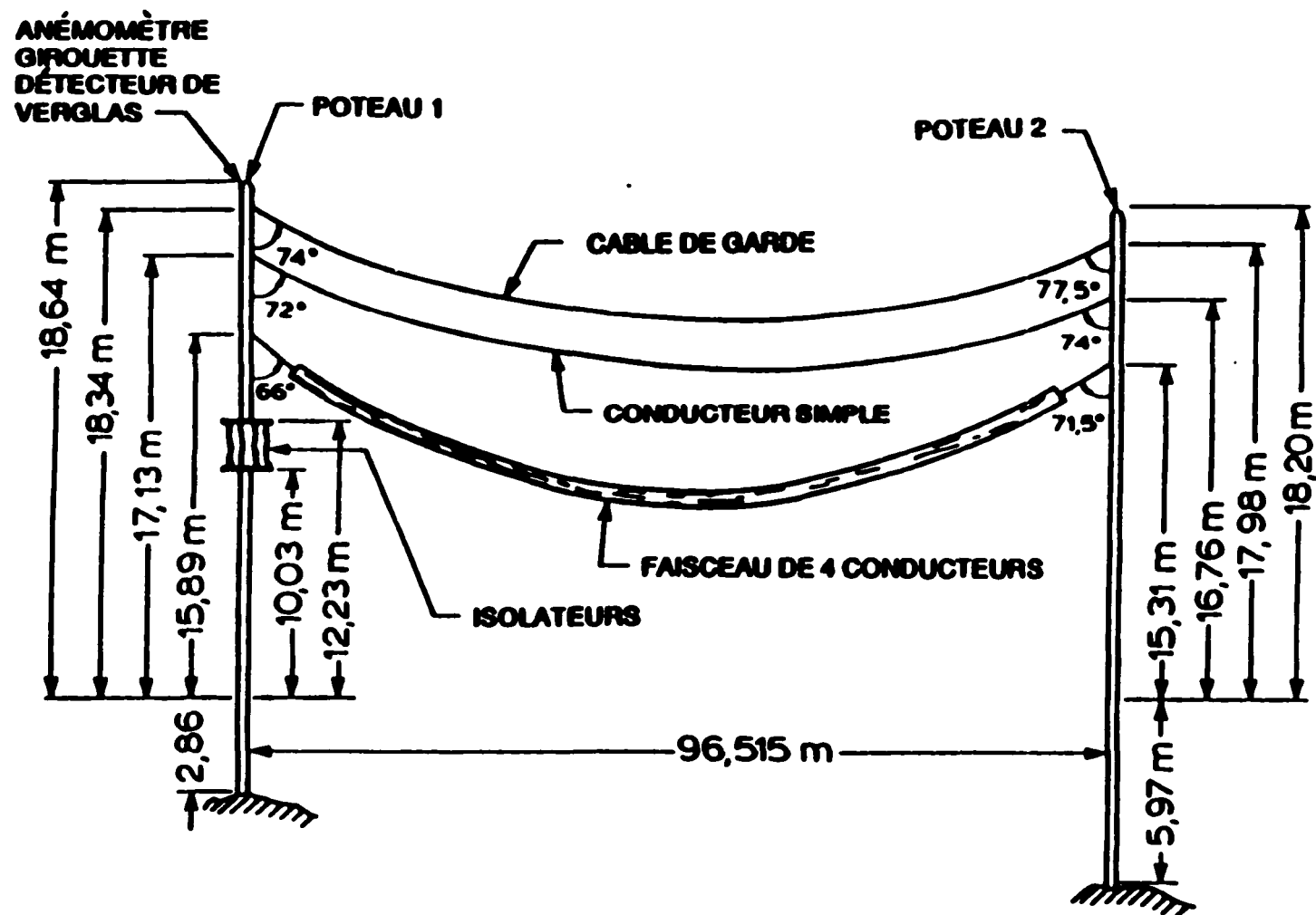


Figure 9: Description du site expérimental au Mont Valin

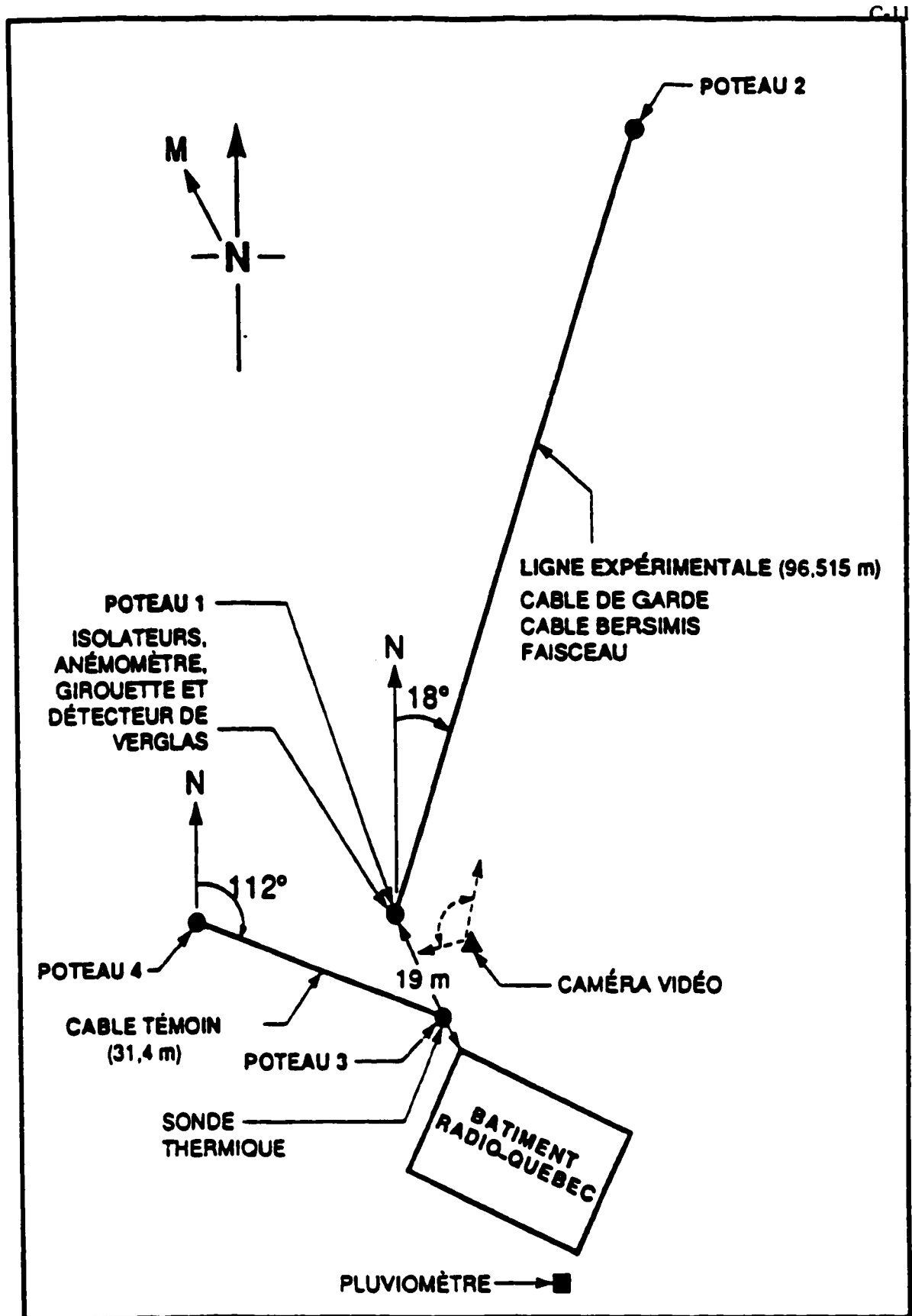


Figure 10: Caractéristiques des câbles de la ligne expérimentale



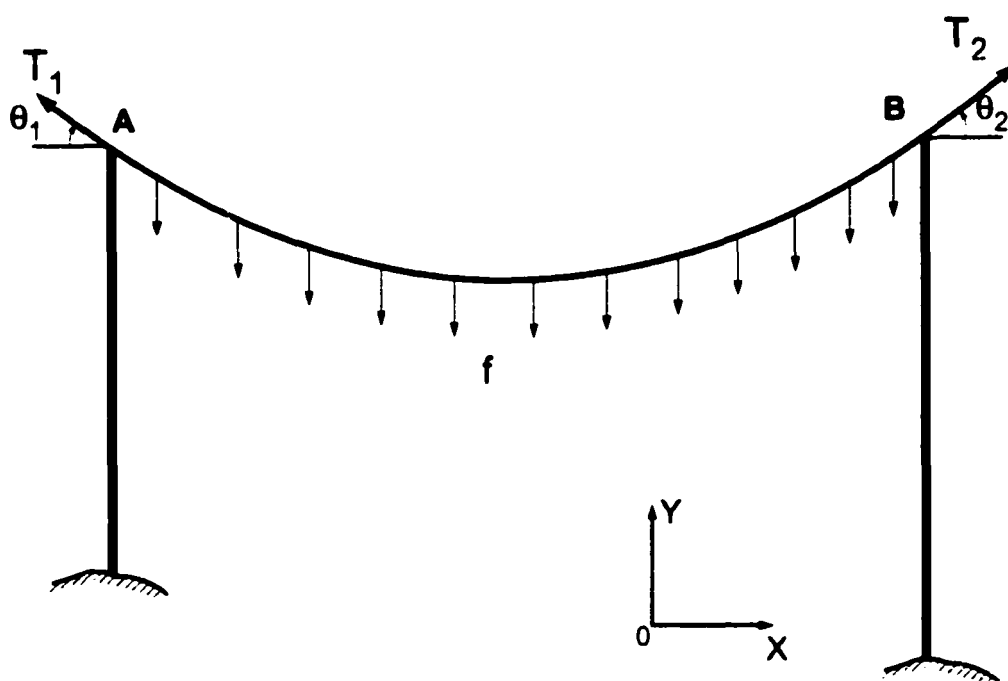


Figure 11 : Système de forces agissant sur le câble soumis à une force  $f$

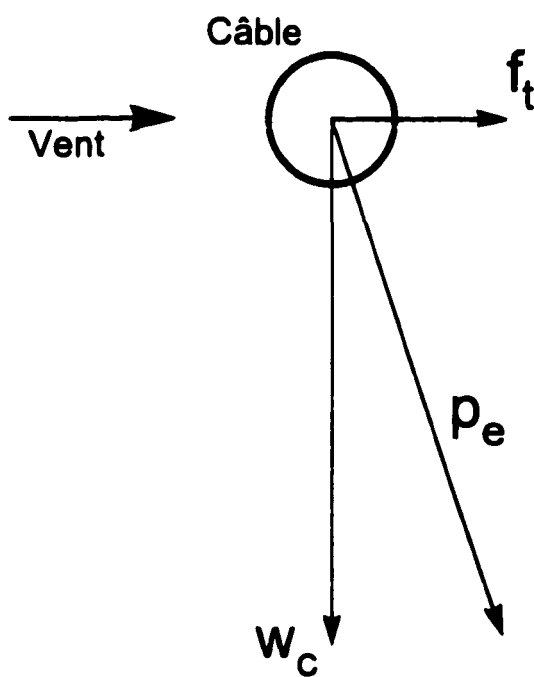


Figure 12 : Poids équivalent du câble provoqué par la force de traînée

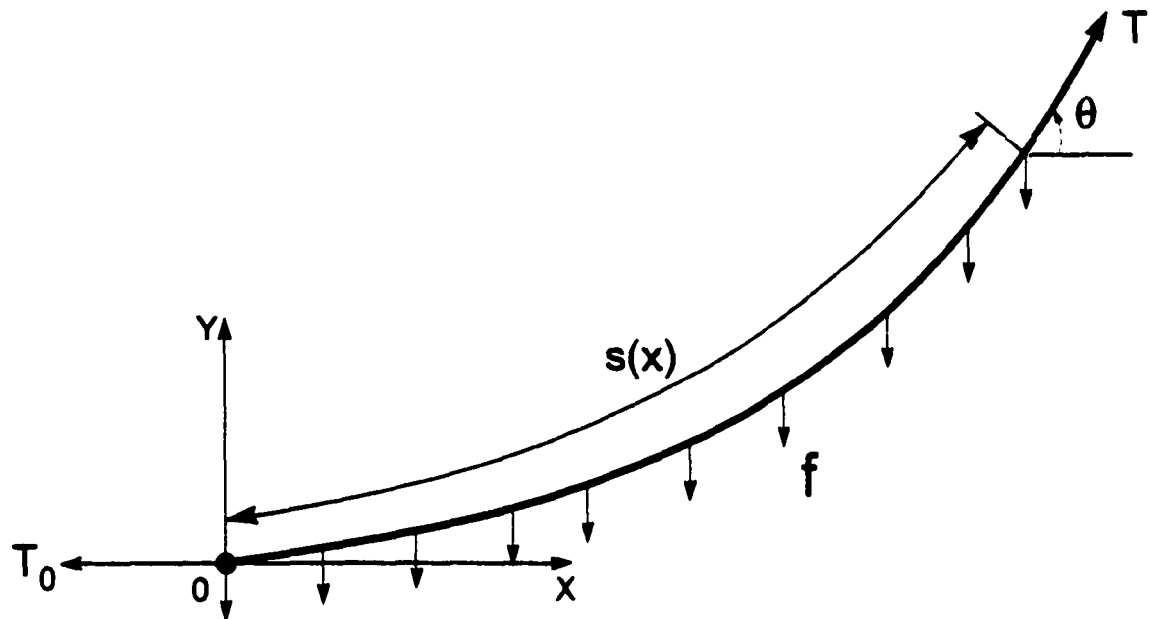


Figure 13 : Diagramme des corps libres d'un segment de câble soumis à une force  $f$

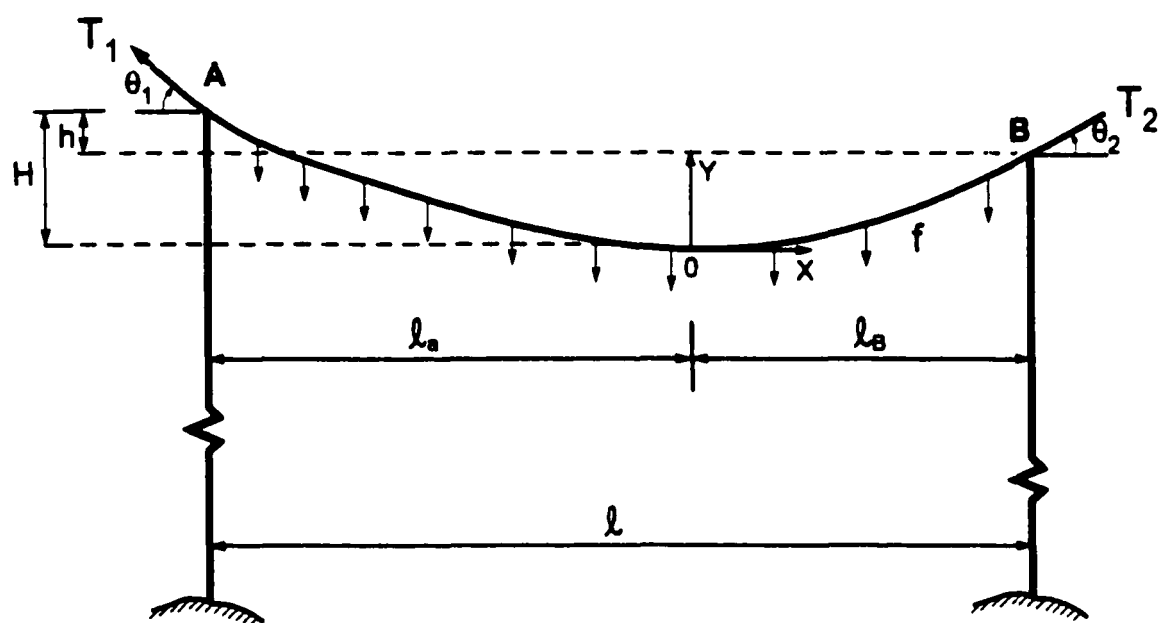


Figure 14 : Variables intervenant dans les équations caténares

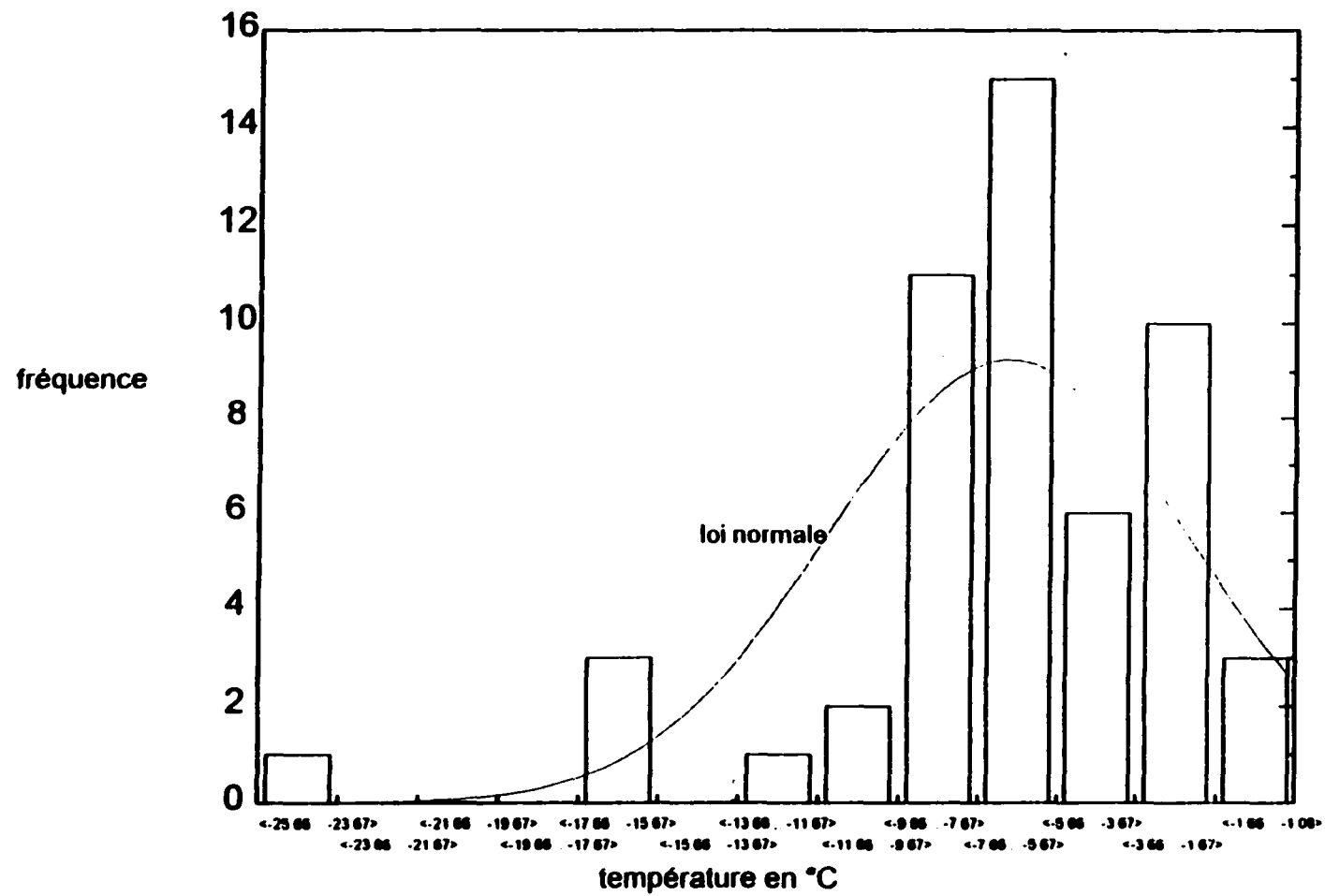


Figure 15: Distribution de la température dans le cas du givre (câble de garde)

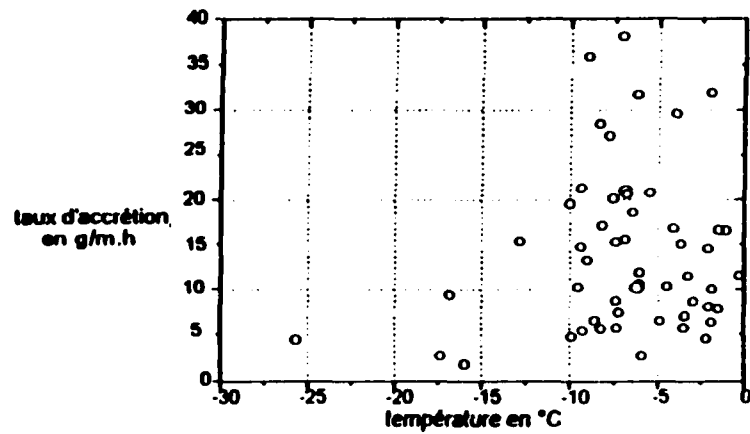


Figure 16.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

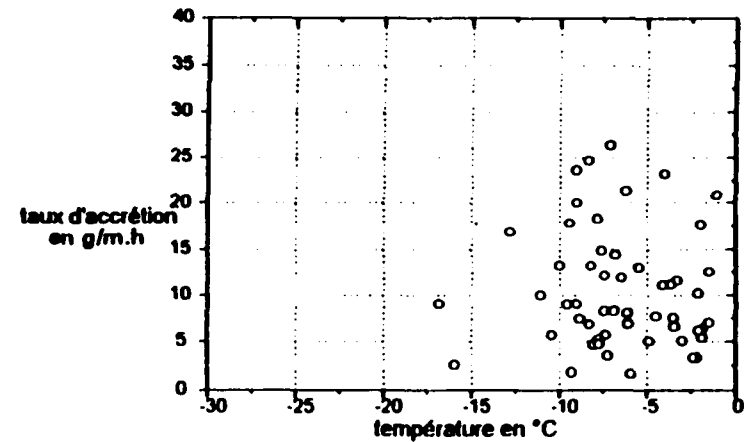


Figure 16.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

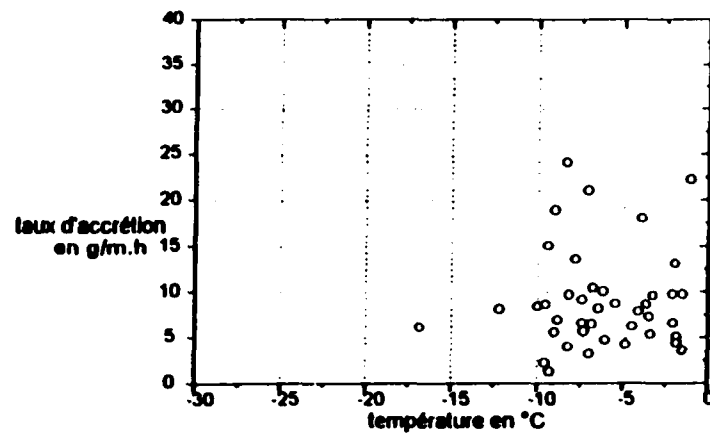


Figure 16.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

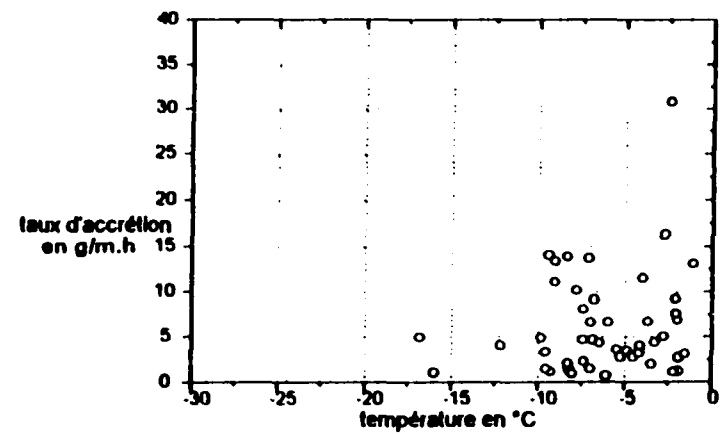


Figure 16.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 16: Relations entre le taux d'accrétion et la température dans le cas du givre

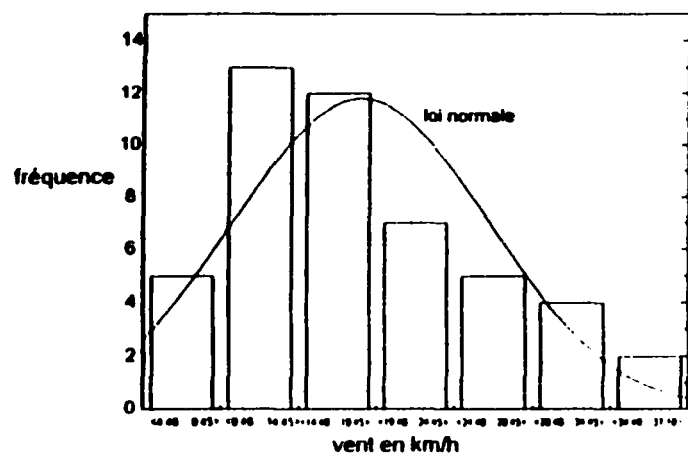


Figure 17.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

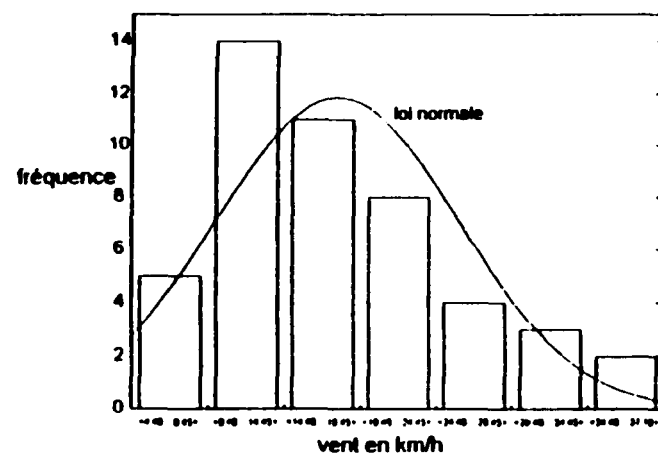


Figure 17.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

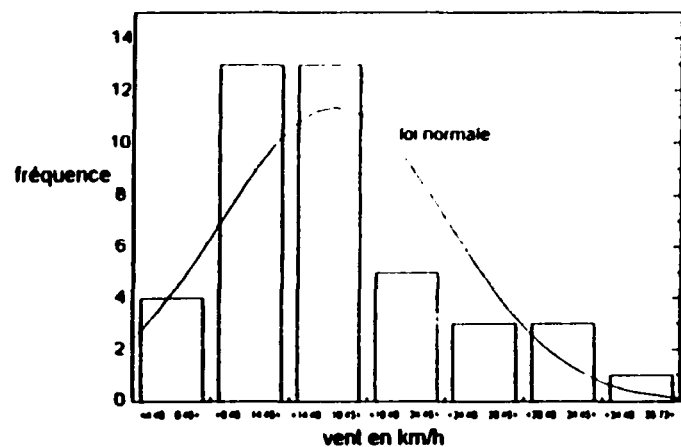


Figure 17.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

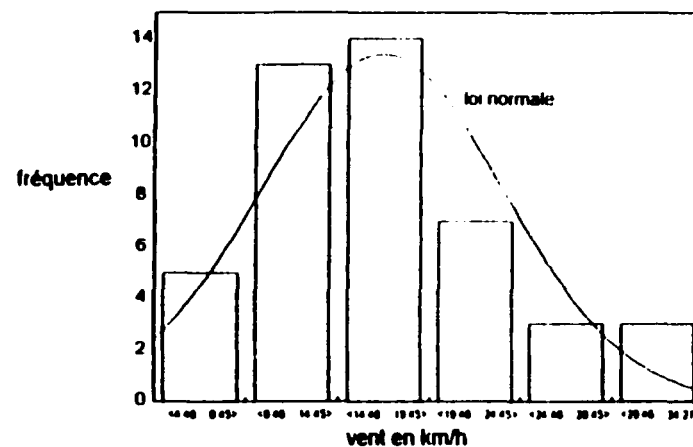


Figure 17.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 17: Distributions de la vitesse perpendiculaire du vent dans le cas du givre

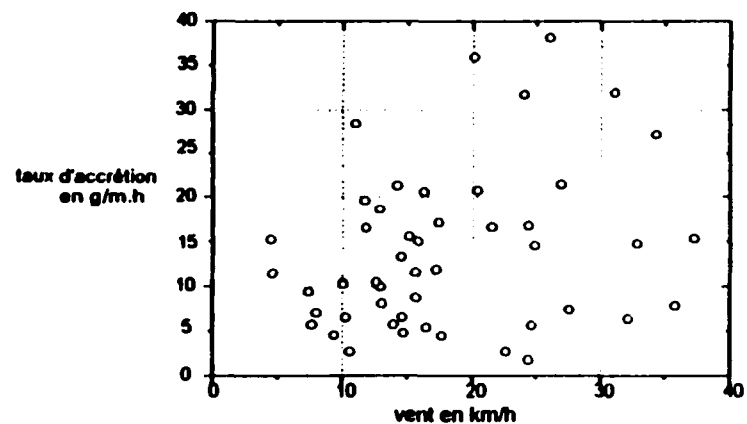


Figure 18.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

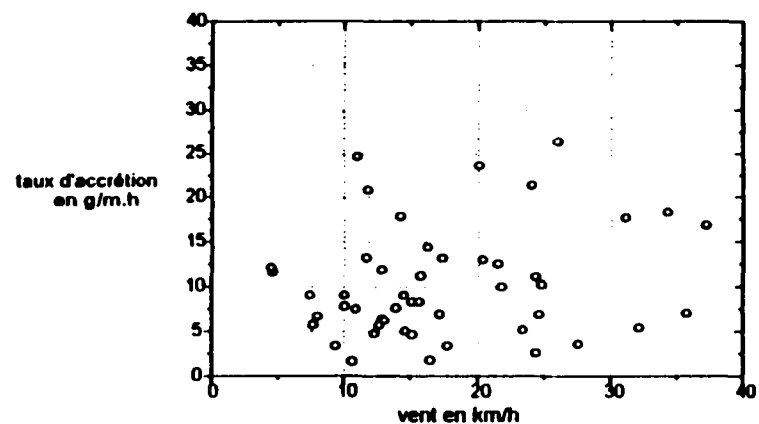


Figure 18.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

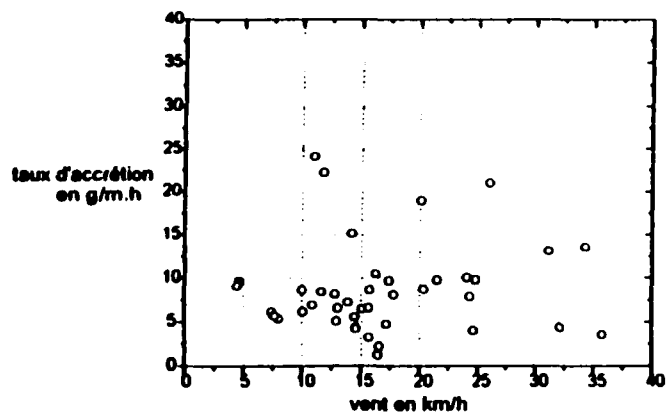


Figure 18.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

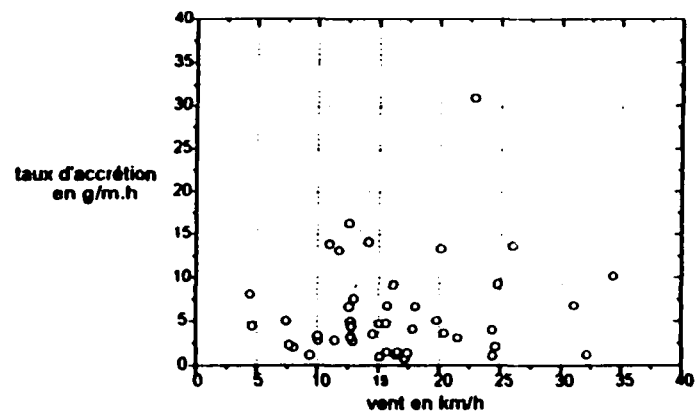


Figure 18.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 18: Relations entre le taux d'accrétion et la vitesse perpendiculaire du vent dans le cas du givre



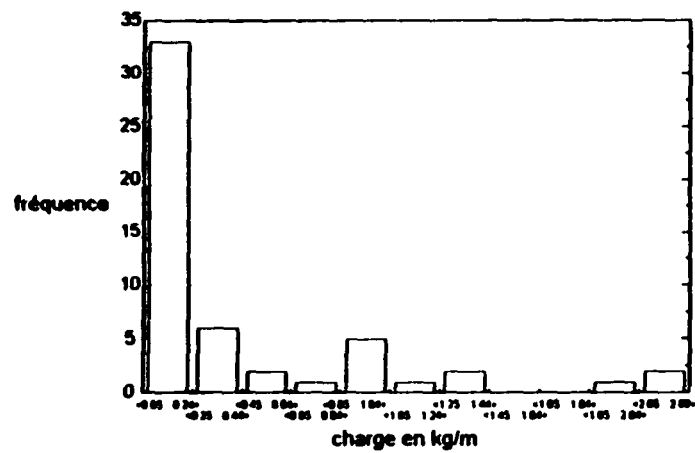


Figure 19.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

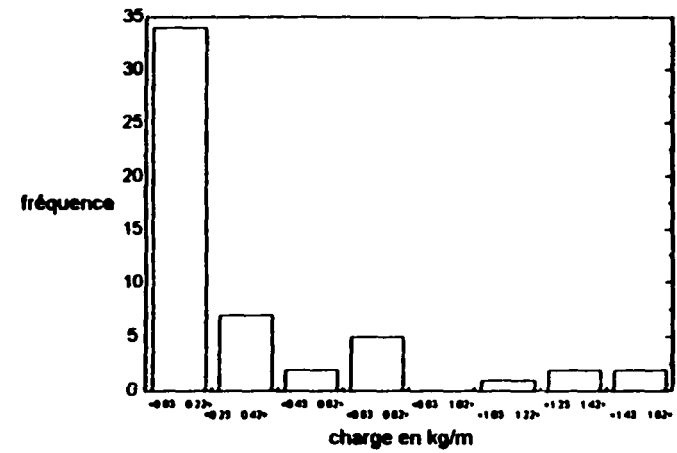


Figure 19.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

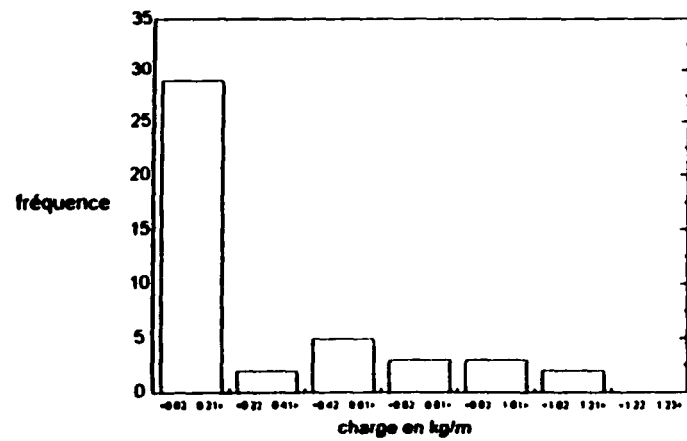


Figure 19.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

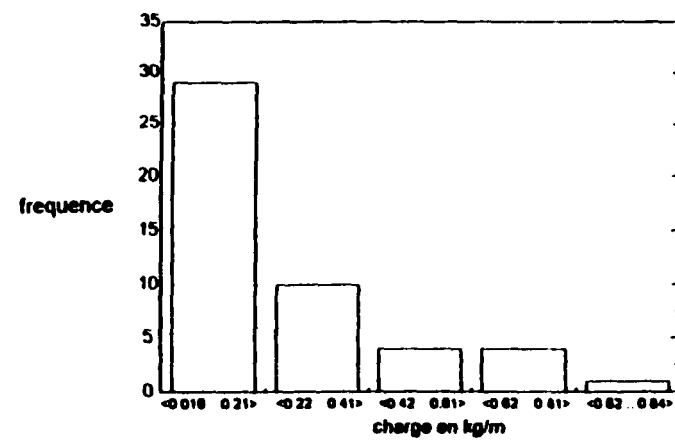


Figure 19.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 19: Distributions de la charge de glace en fin de phase d'accrétion dans le cas du givre

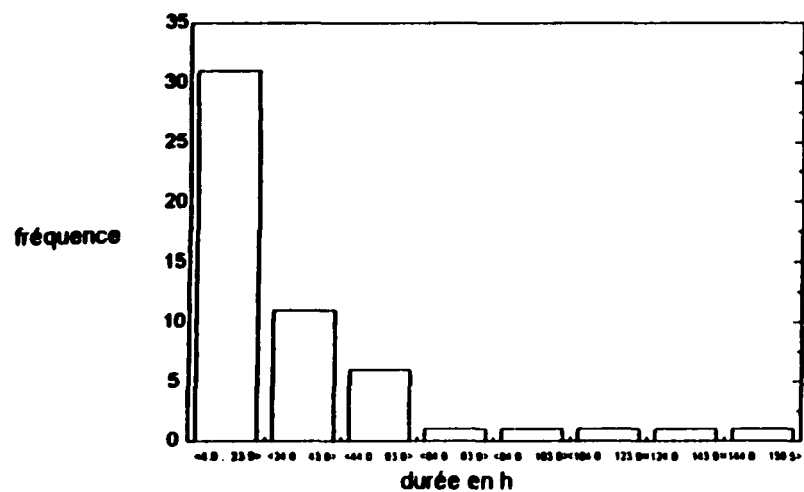


Figure 20.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

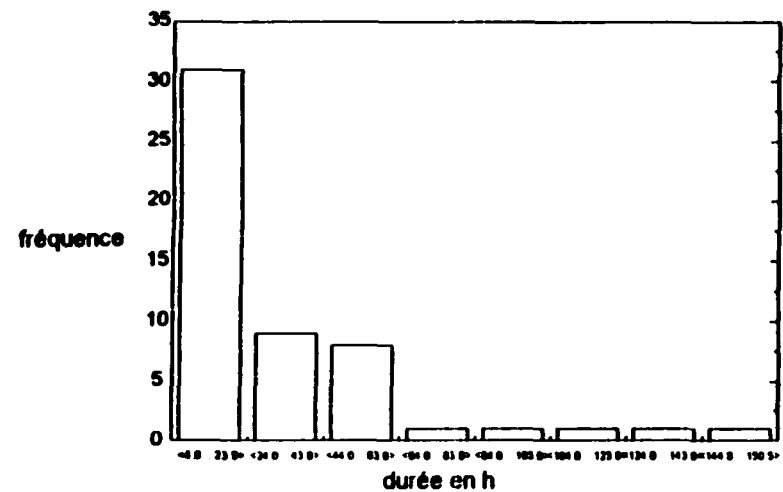


Figure 20.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

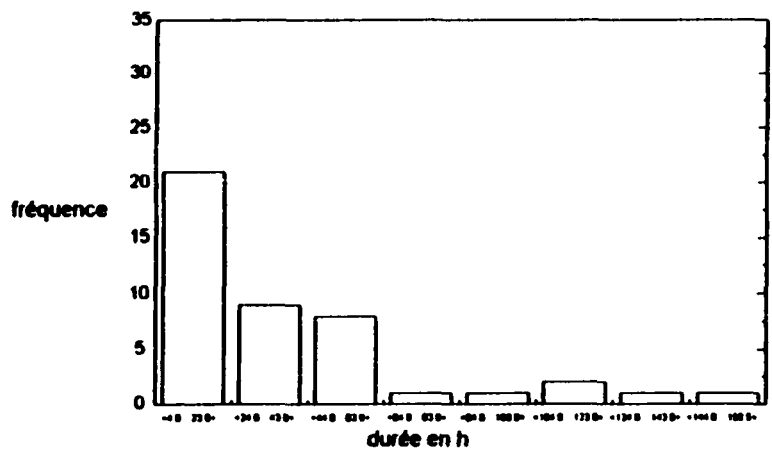


Figure 20.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

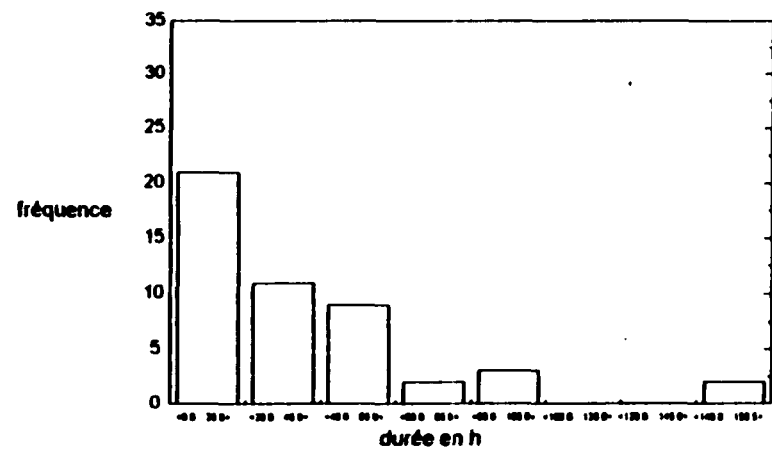


Figure 20.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 20: Distributions de la durée de la phase d'accrétion dans le cas du givre

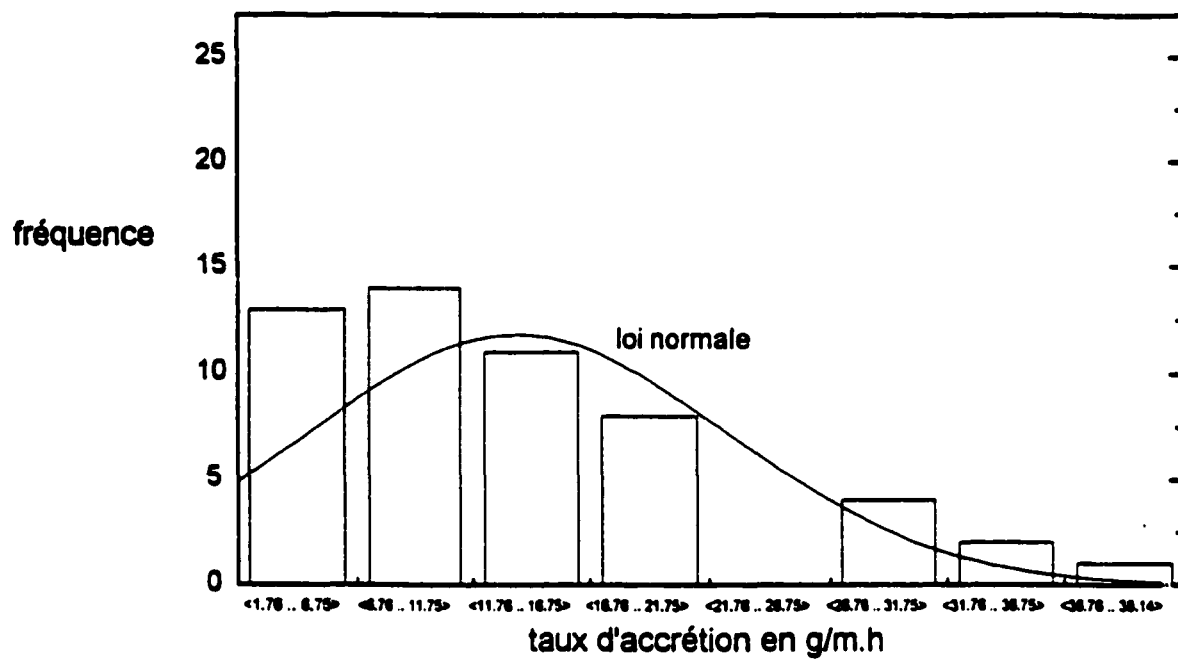


Figure 21.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

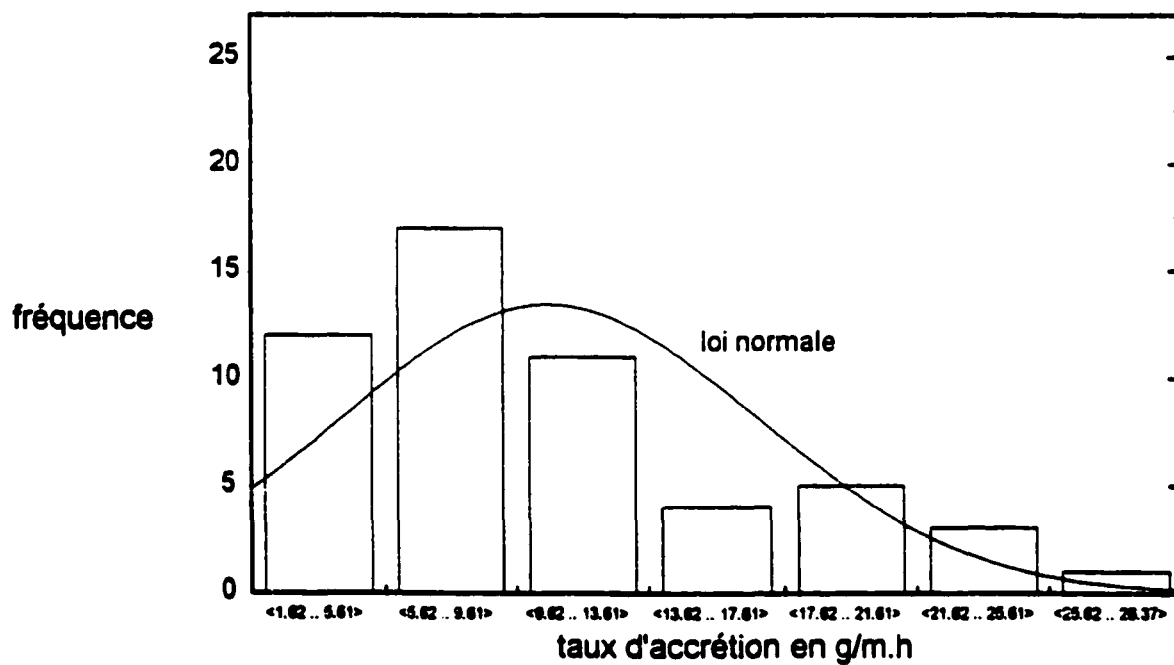


Figure 21.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

Figure 21 : Distributions du taux d'accrétion dans le cas du givre

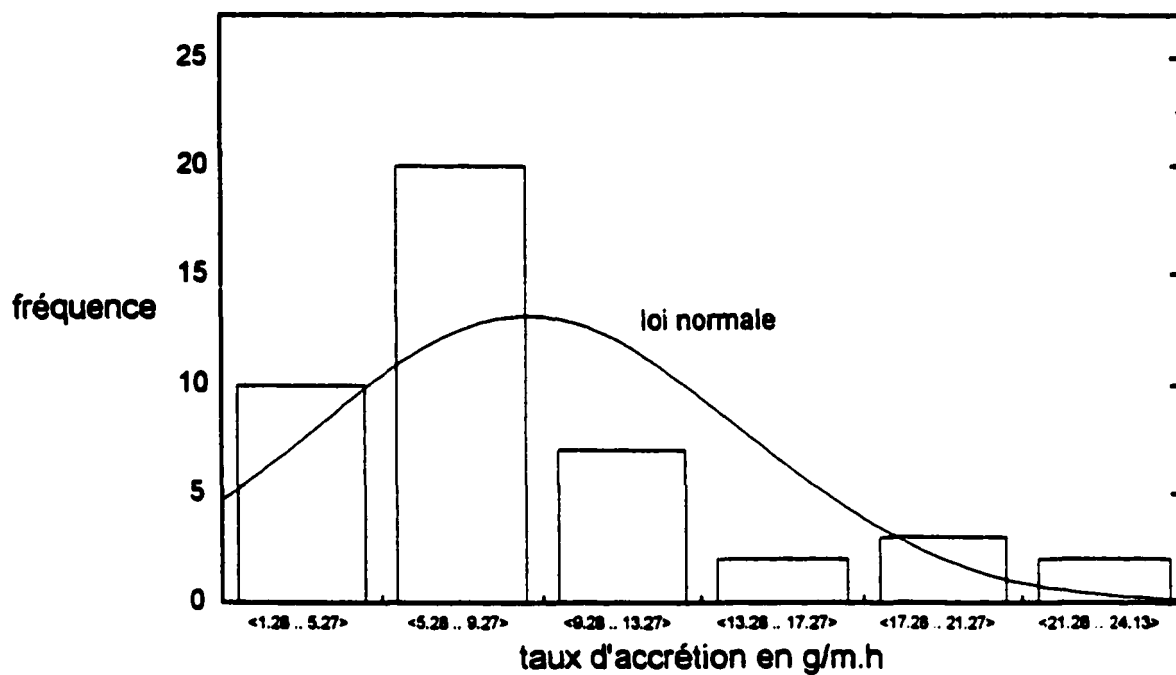


Figure 21.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

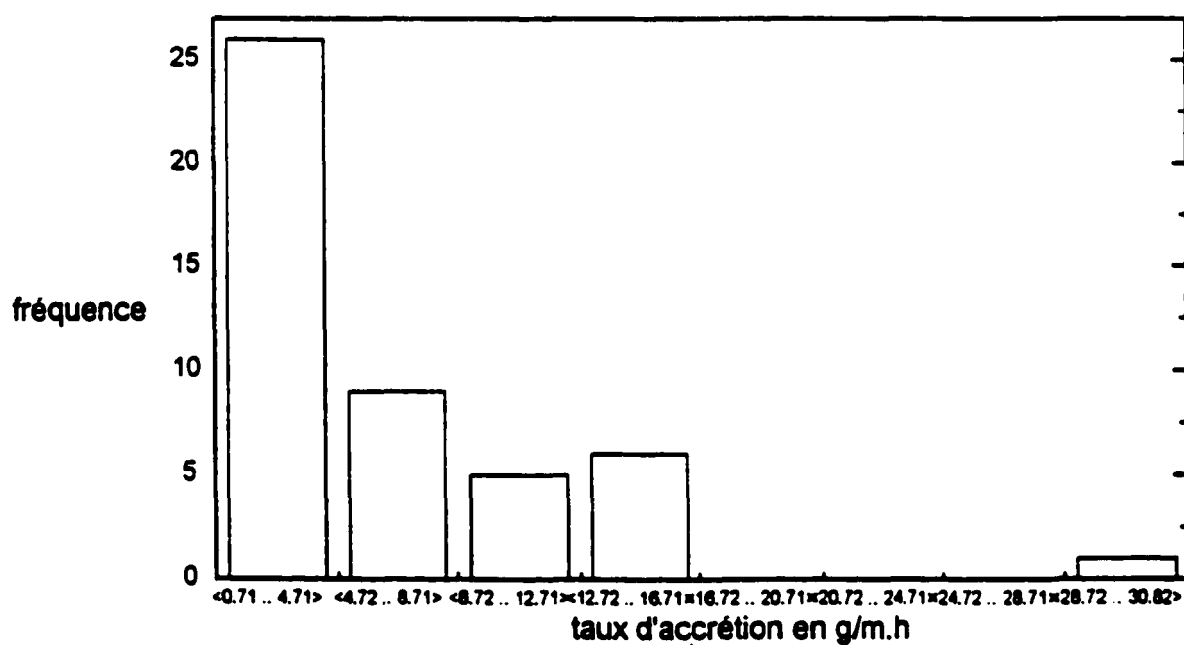


Figure 21.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 21(suite): Distributions du taux d'accrétion dans le cas du givre

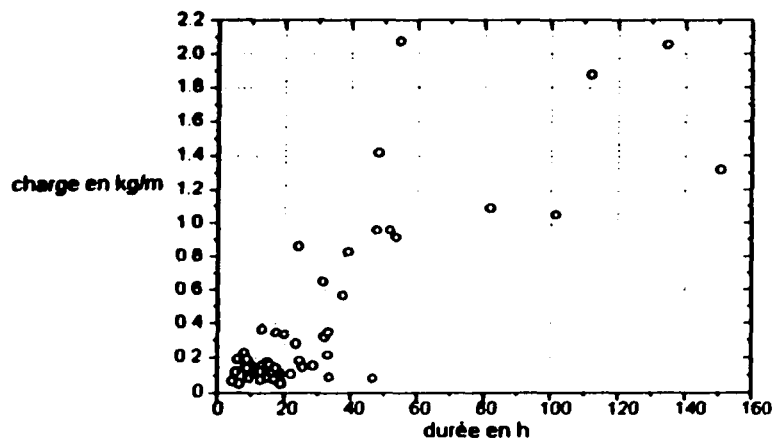


Figure 22.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

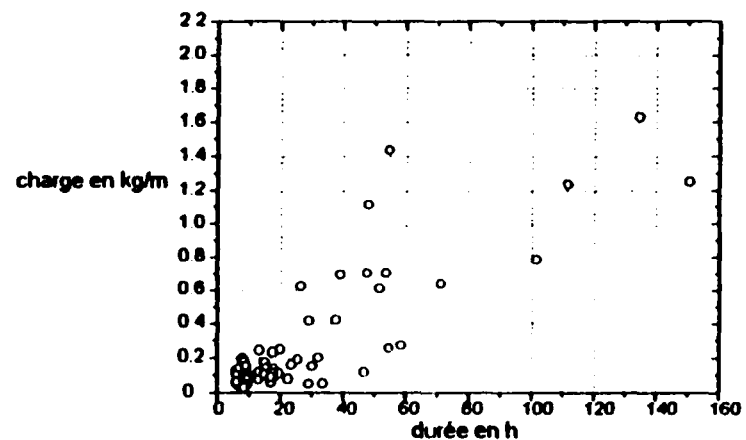


Figure 22.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

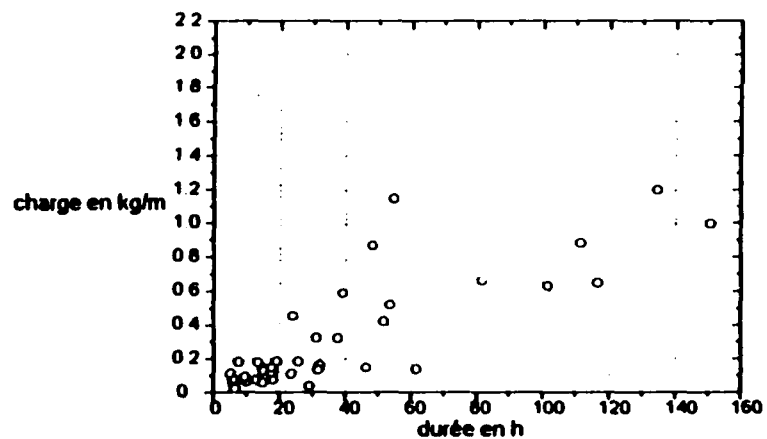


Figure 22.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

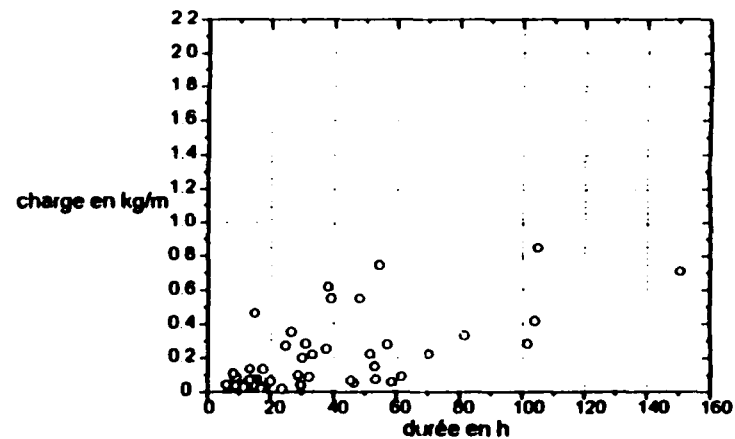


Figure 22.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 22: Relations entre la durée de la phase d'accrétion et la charge de glace en fin de phase d'accrétion dans le cas du givre

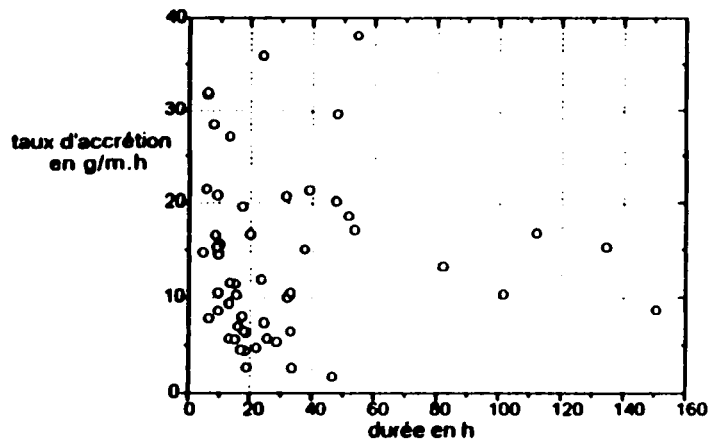


Figure 23.e: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

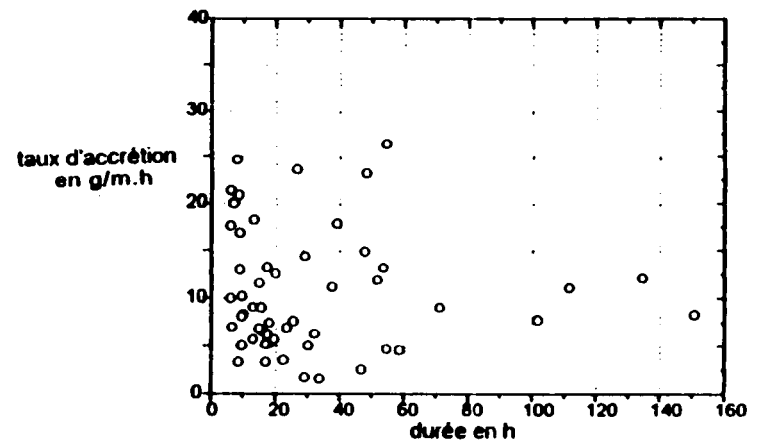


Figure 23.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

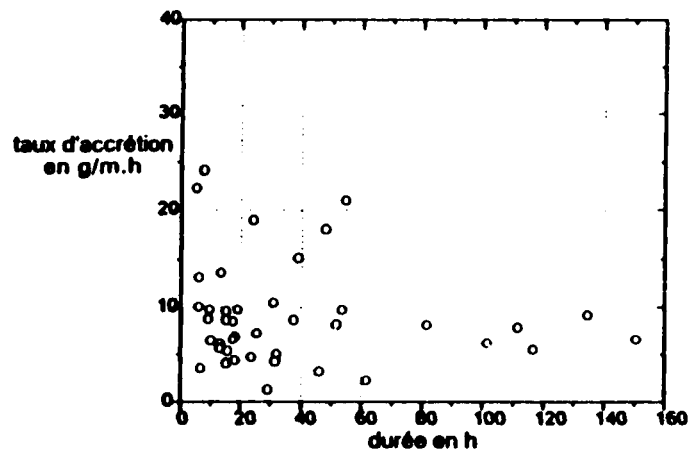


Figure 23.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

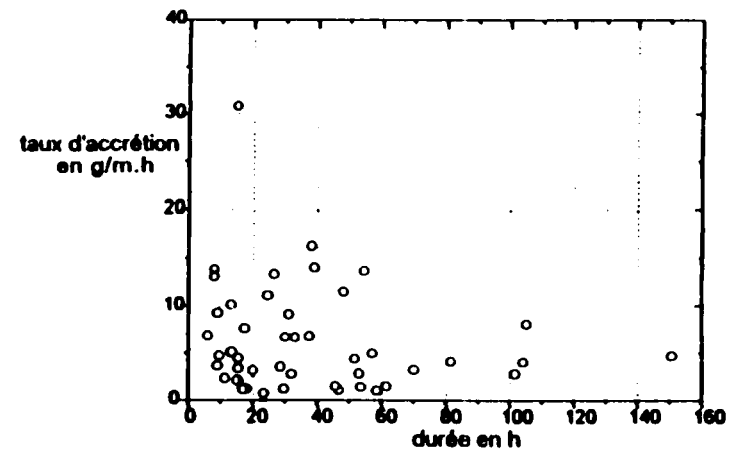


Figure 23.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 23: Relations entre la durée de la phase d'accrétion et le taux d'accrétion dans le cas du givre

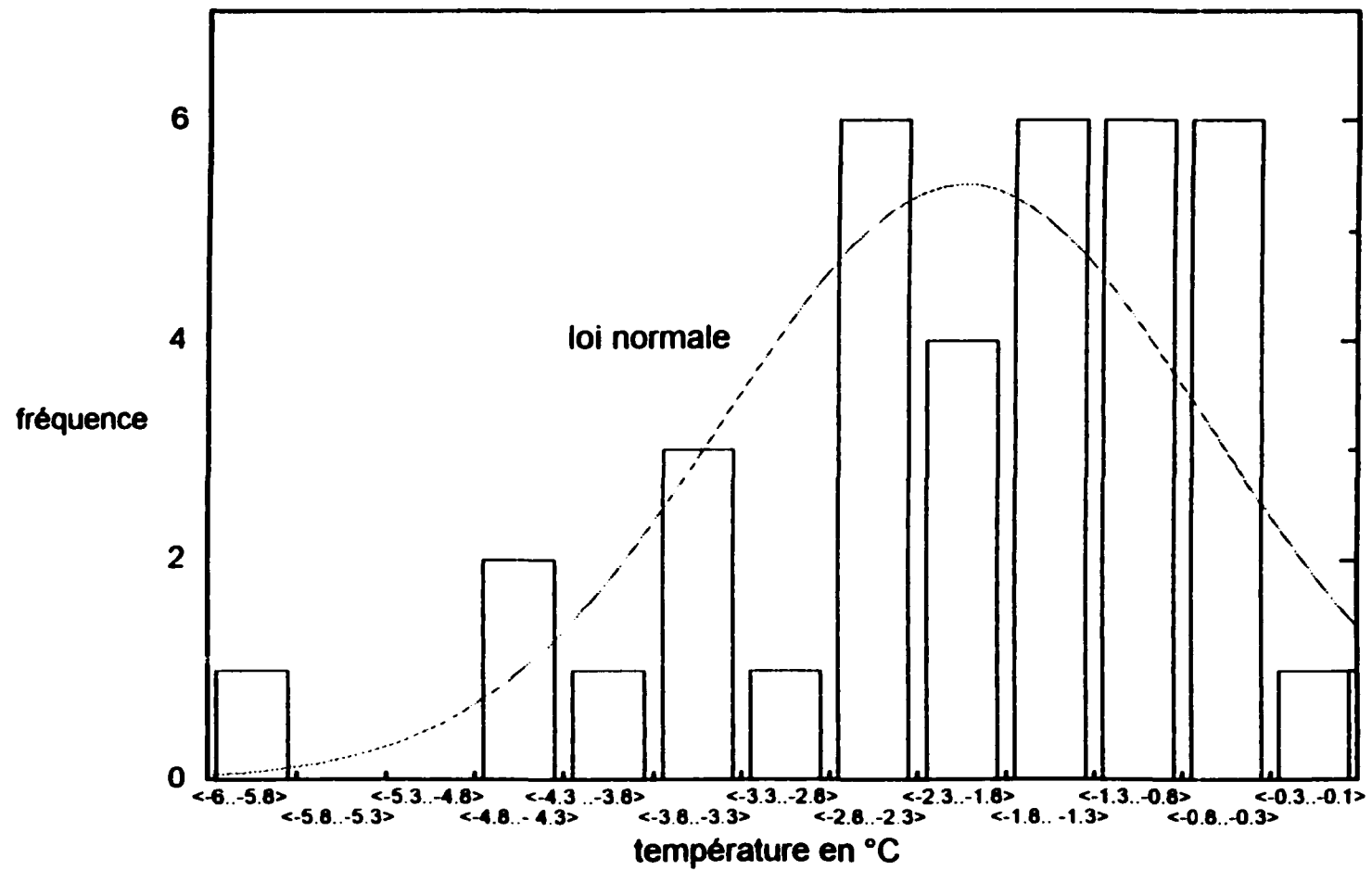


Figure 24: Distribution de la température dans le cas du verglas (câble Bersimis)

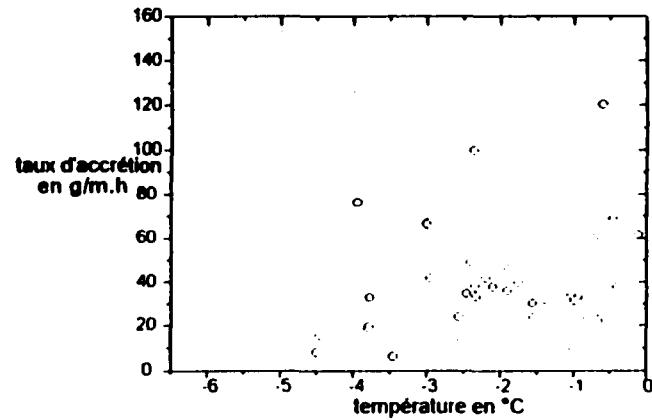


Figure 25.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

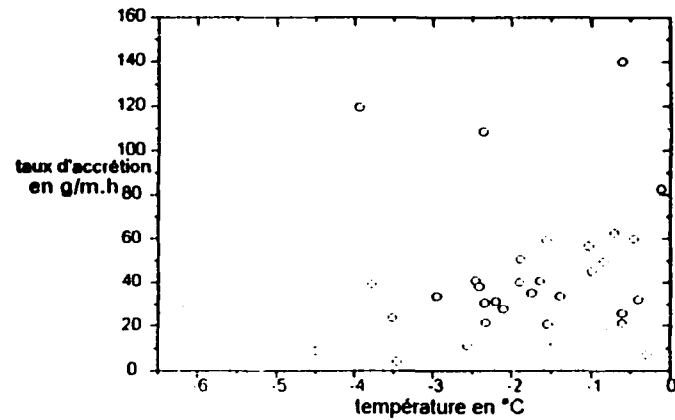


Figure 25.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

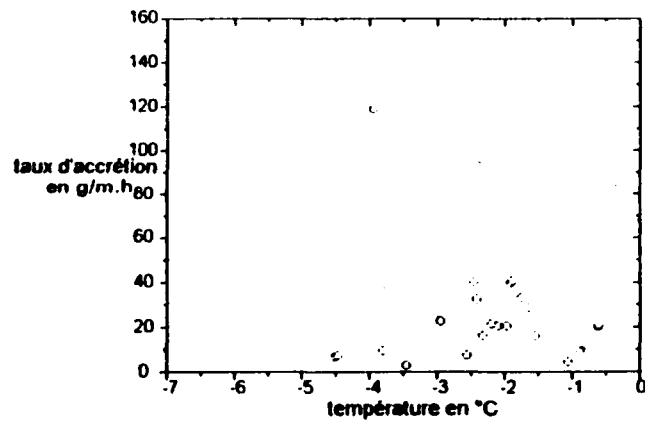


Figure 25.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

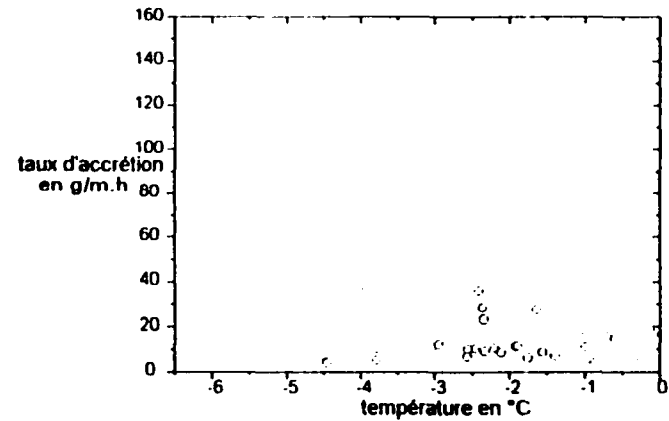


Figure 25.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 25: Relations entre le taux d'accrétion et la température dans le cas du verglas



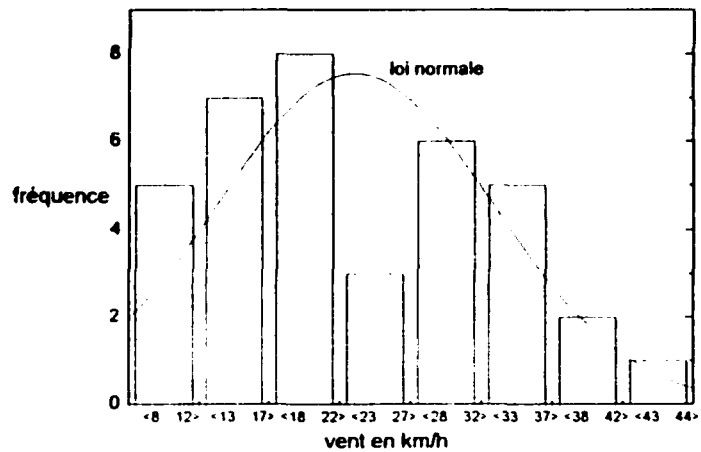


Figure 26.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

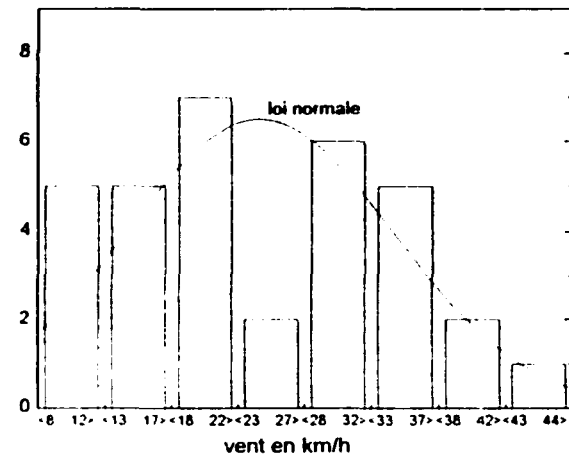


Figure 26.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

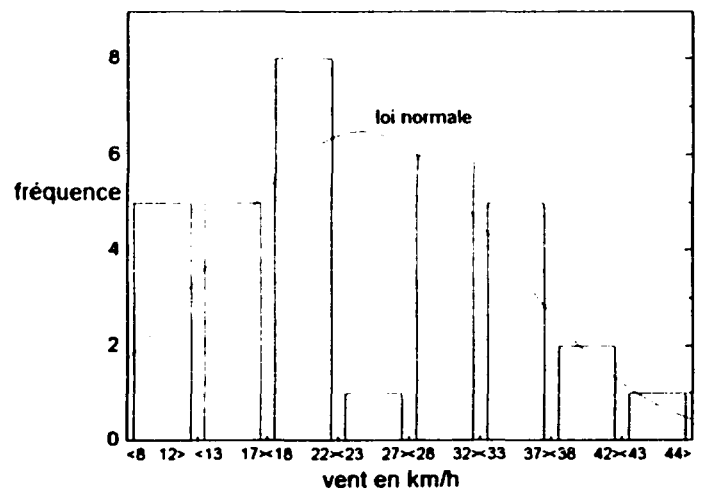


Figure 26.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

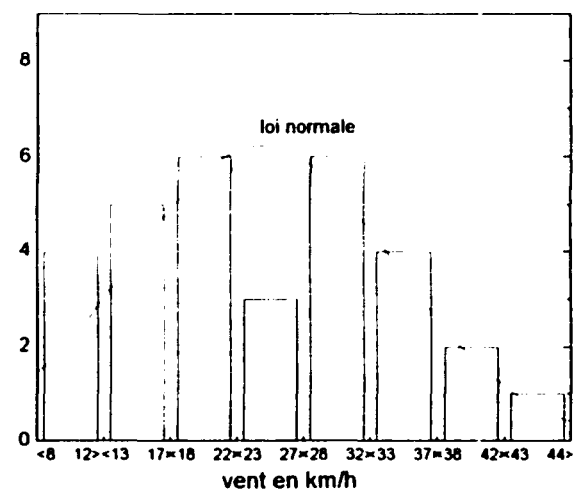


Figure 26.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 26: Distributions de la vitesse perpendiculaire du vent dans le cas du verglas

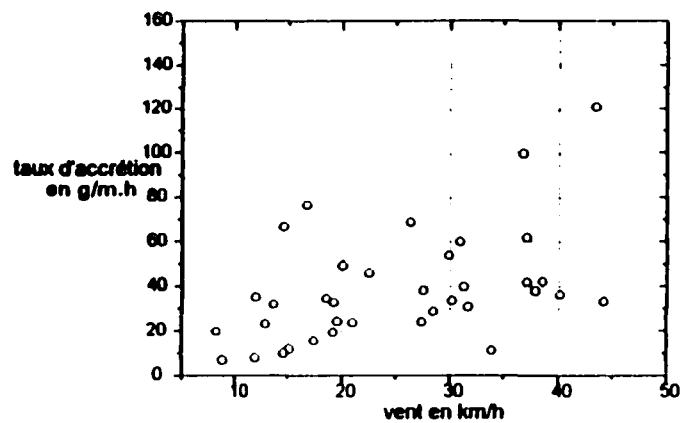


Figure 27.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

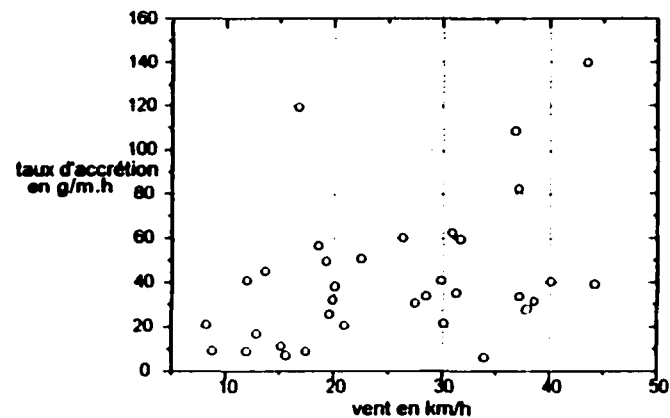


Figure 27.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

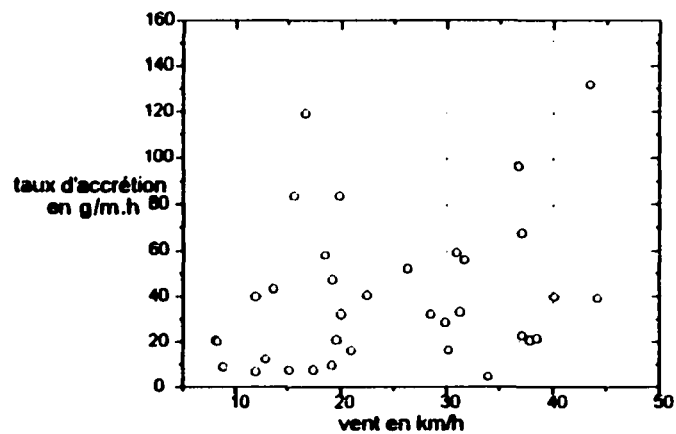


Figure 27.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

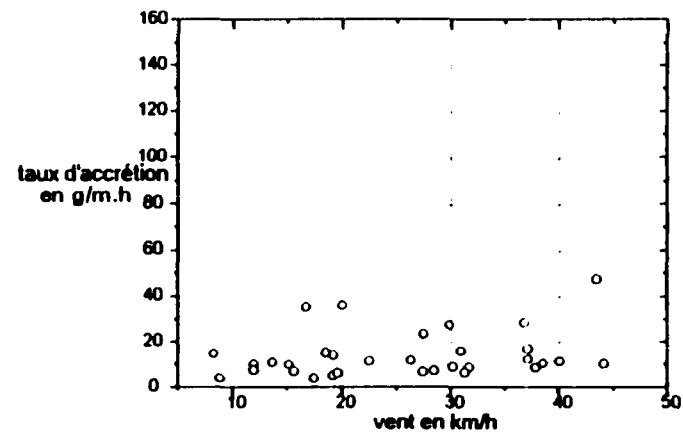


Figure 27.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 27: Relations entre le taux d'accrétion et la vitesse perpendiculaire du vent dans le cas du verglas

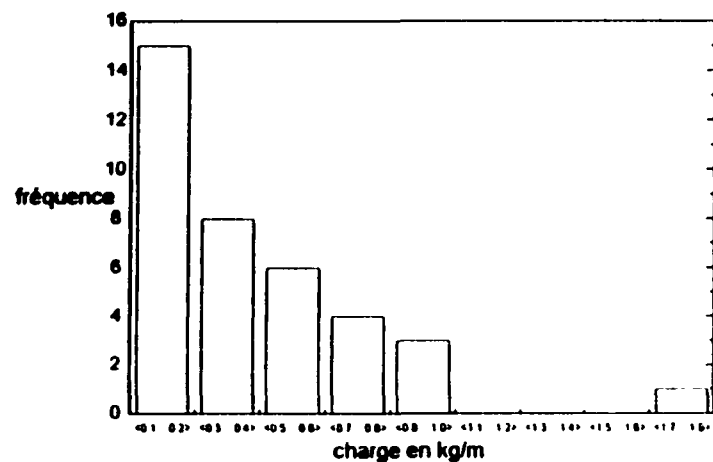


Figure 28.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

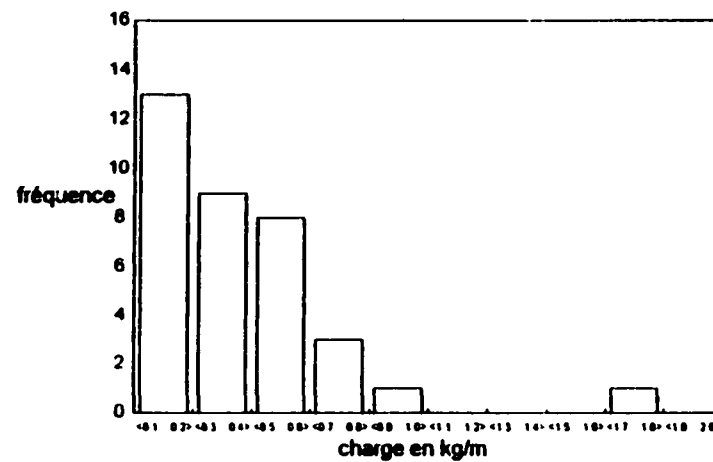


Figure 28.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

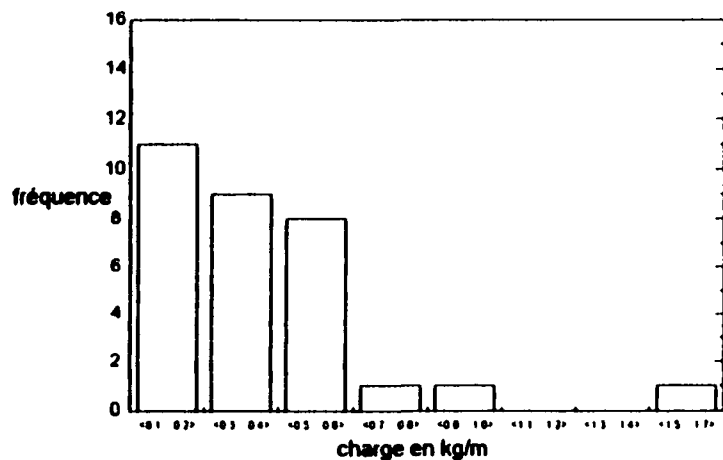


Figure 28.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

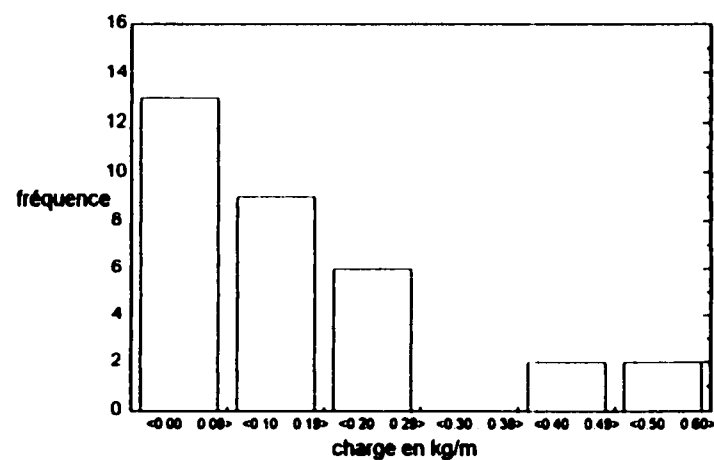


Figure 28.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 28: Distributions de la charge de glace en fin de phase d'accrétion dans le cas du verglas

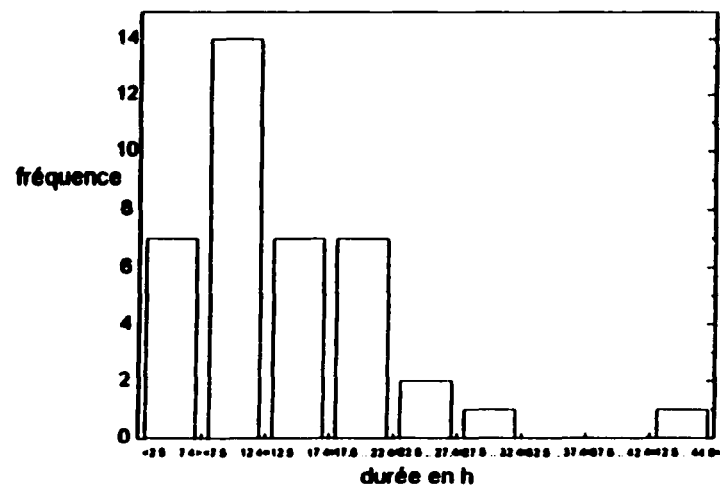


Figure 29.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

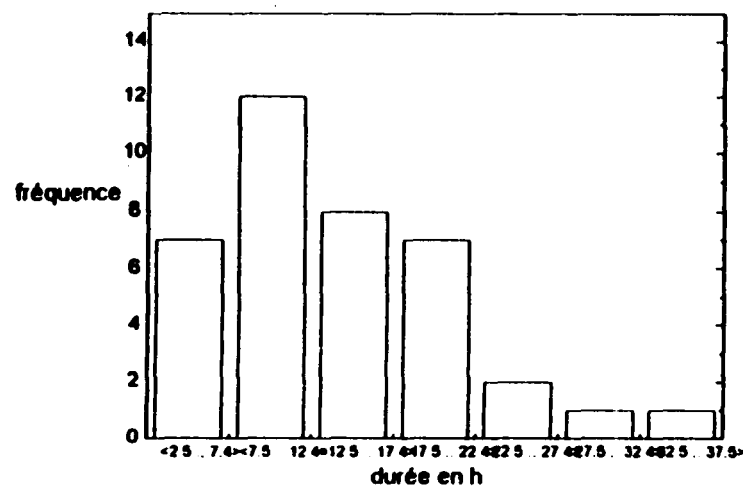


Figure 29.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

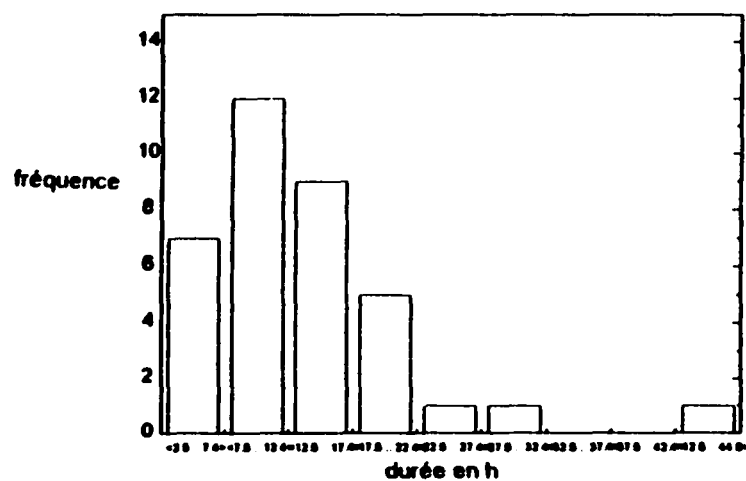


Figure 29.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

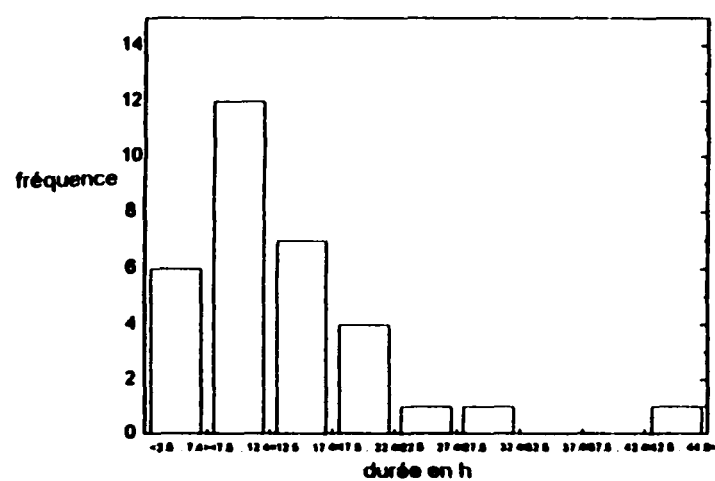


Figure 29.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 29: Distributions de la durée de la phase d'accrétion dans le cas du verglas

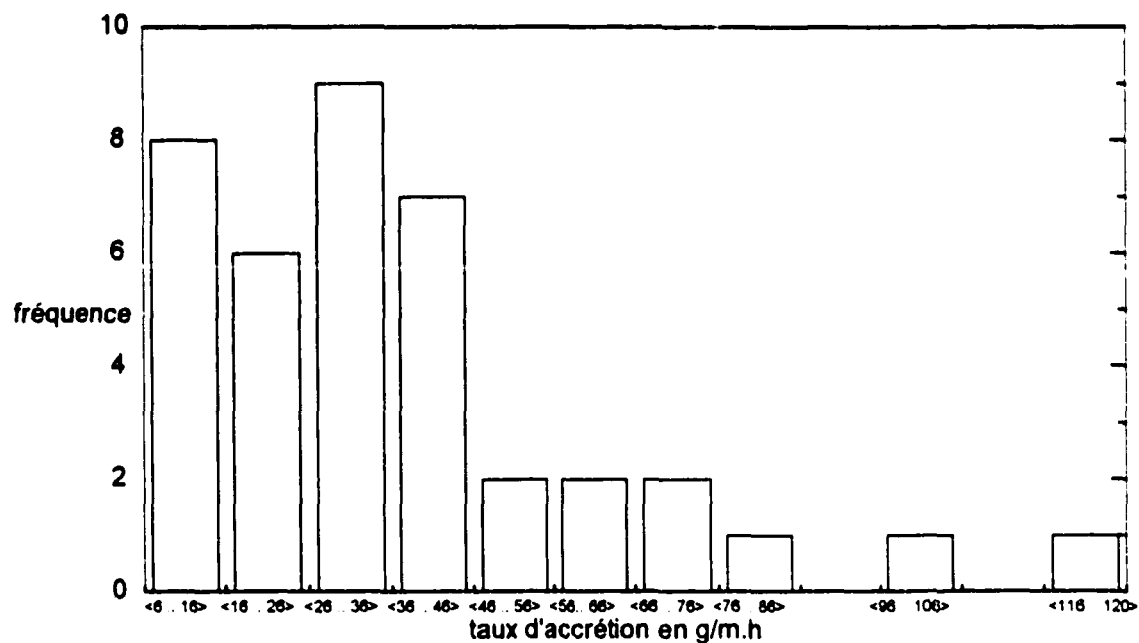


Figure 30.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

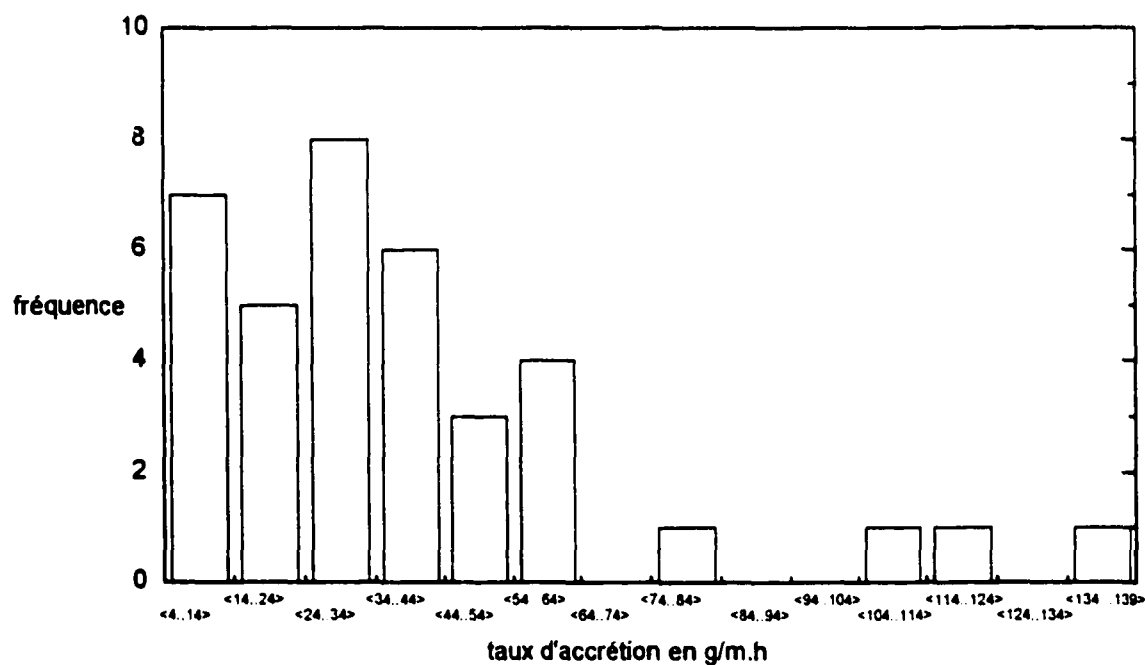


Figure 30.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

Figure 30: Distributions du taux d'accrétion dans le cas du verglas

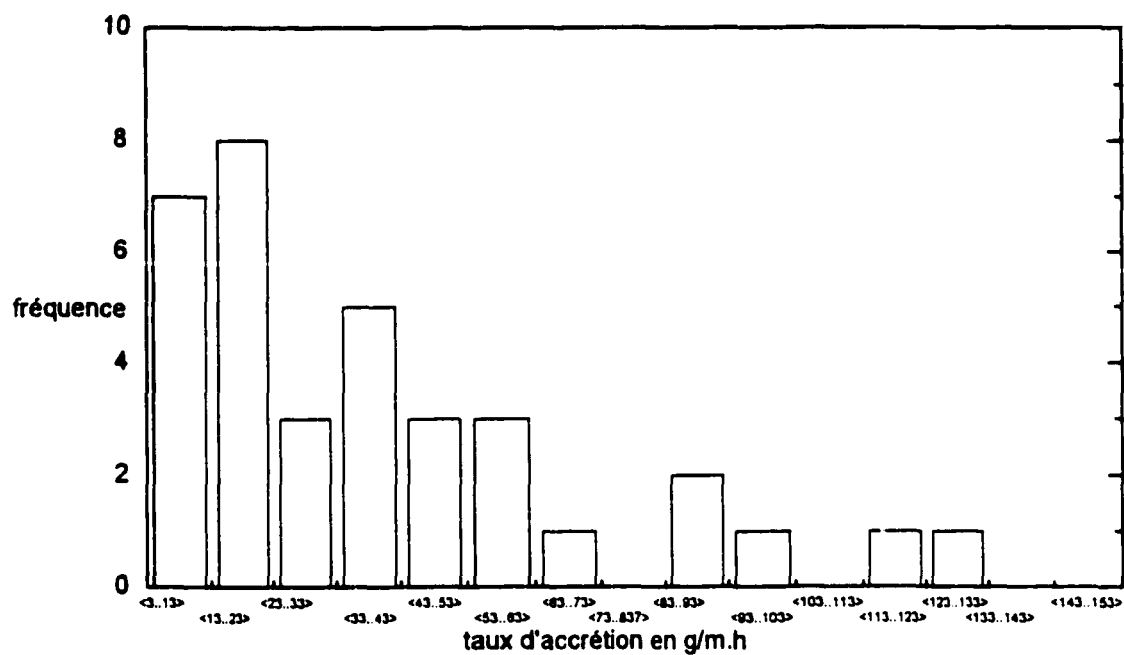


Figure 30.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

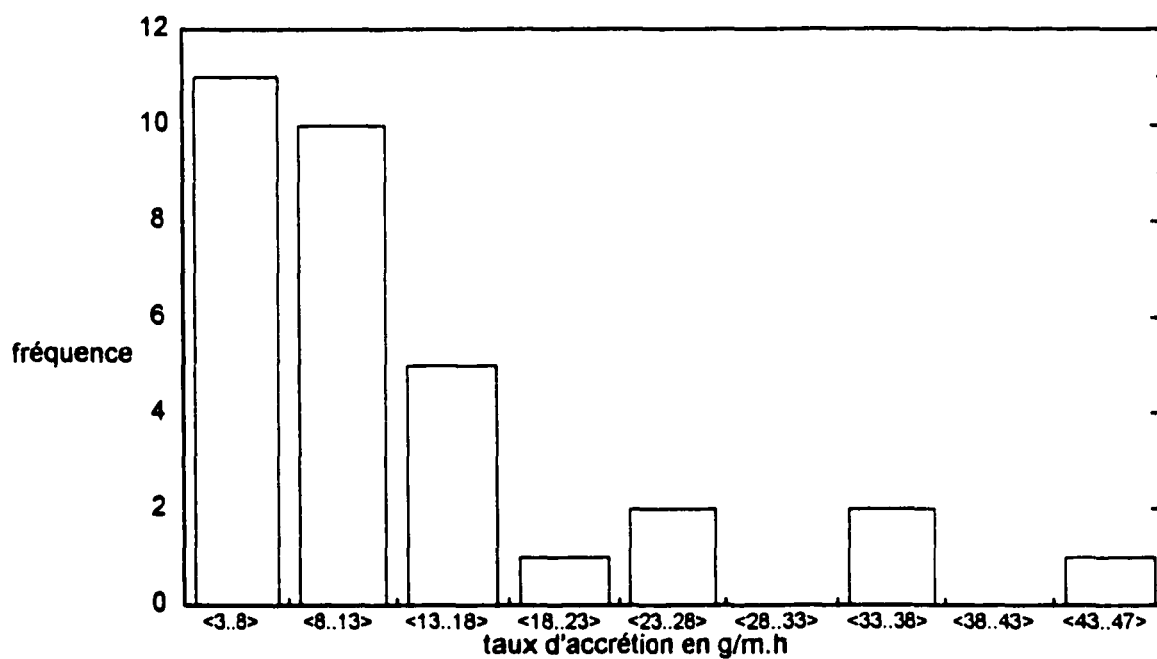


Figure 30.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 30 (suite): Distributions du taux d'accrétion dans le cas du verglas

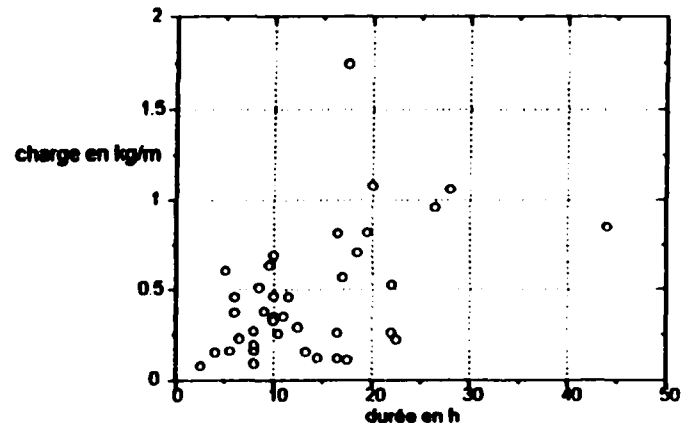


Figure 31.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

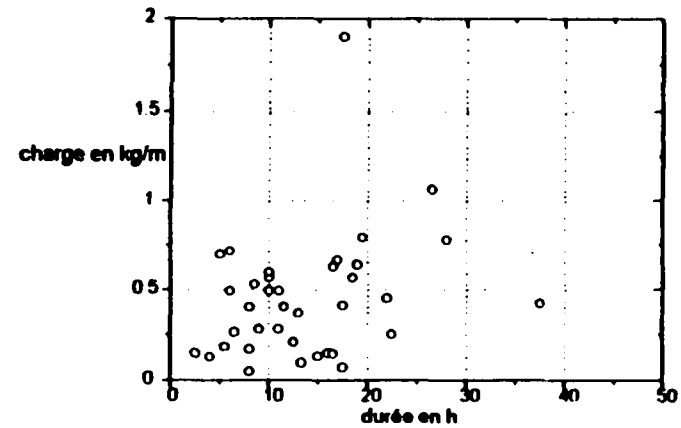


Figure 31.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

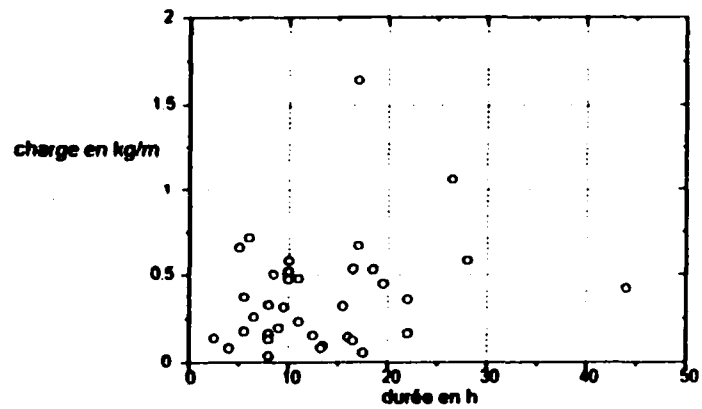


Figure 31.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

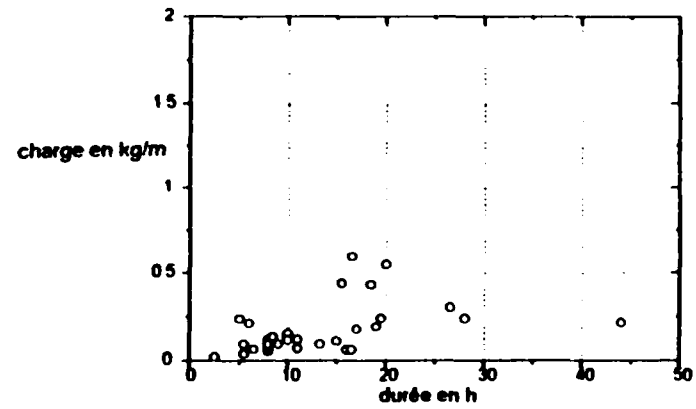


Figure 31.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 31: Relations entre la durée de la phase d'accrétion et la charge de glace en fin de phase d'accrétion dans le cas du verglas

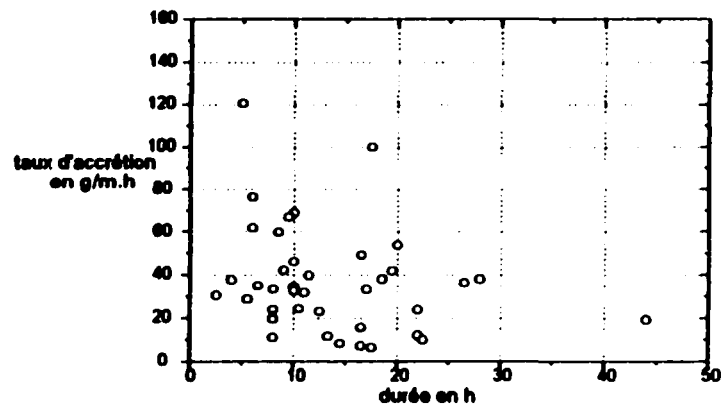


Figure 32.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

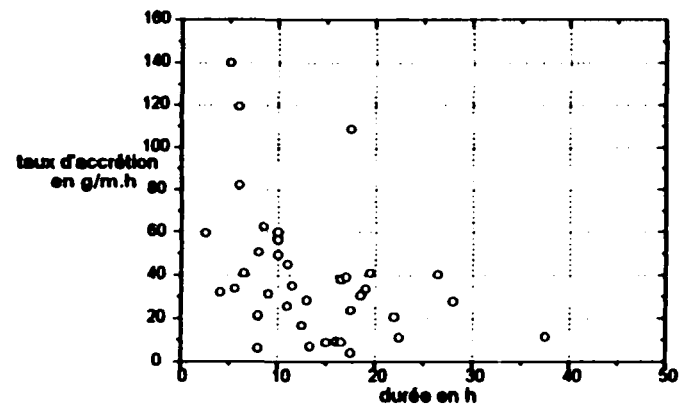


Figure 32.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

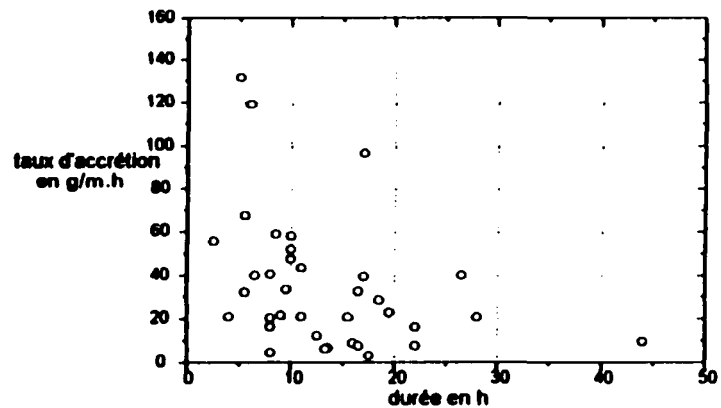


Figure 32.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

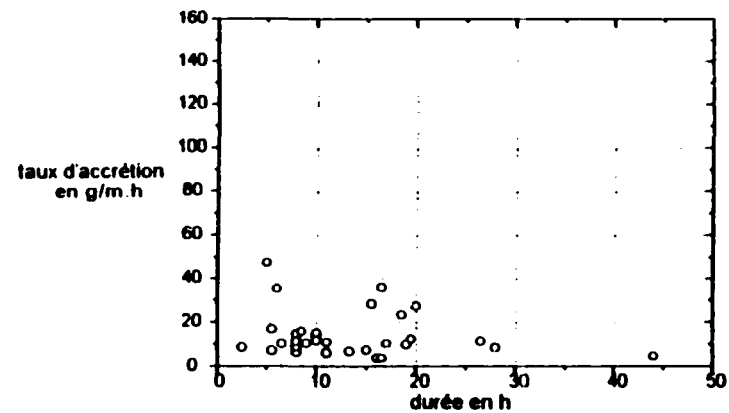


Figure 32.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 32: Relations entre la durée de la phase d'accrétion et le taux d'accrétion dans le cas du verglas



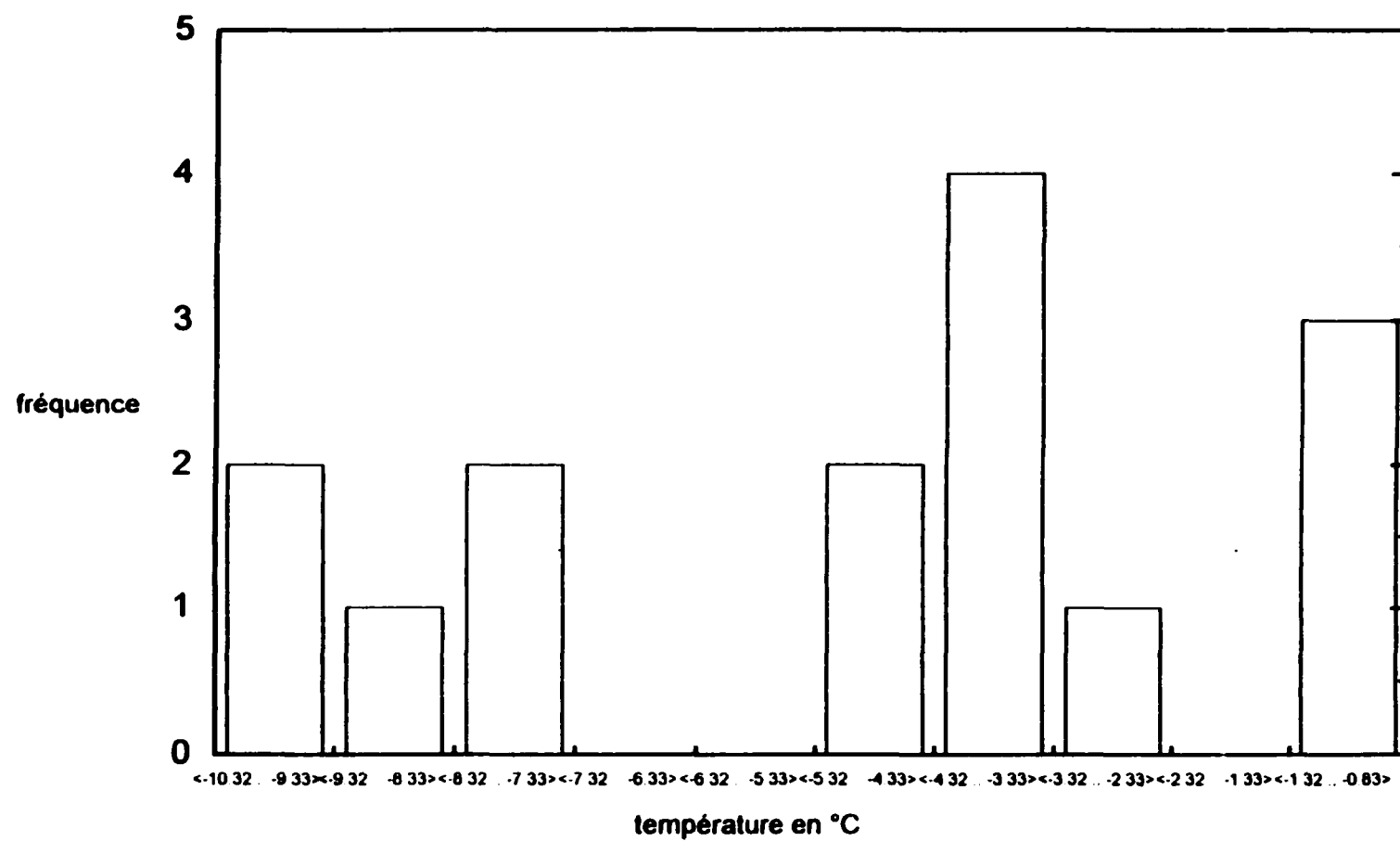


Figure 33: Distribution de la température dans le cas des mélanges (câble de garde)

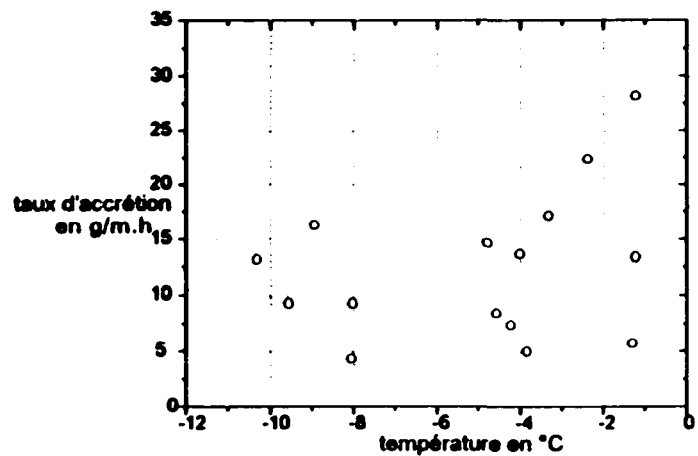


Figure 34.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

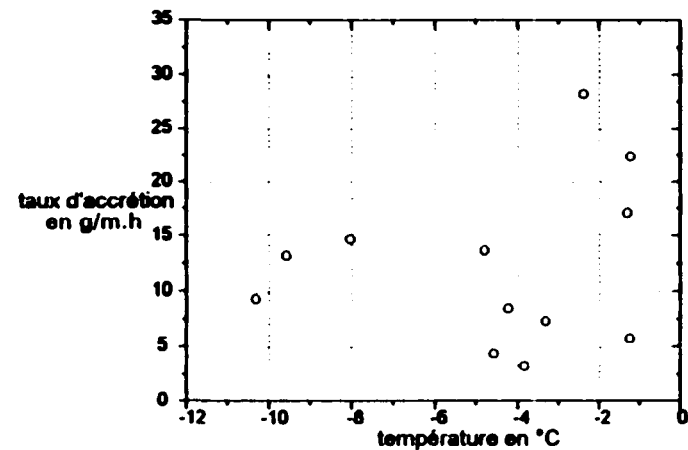


Figure 34.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

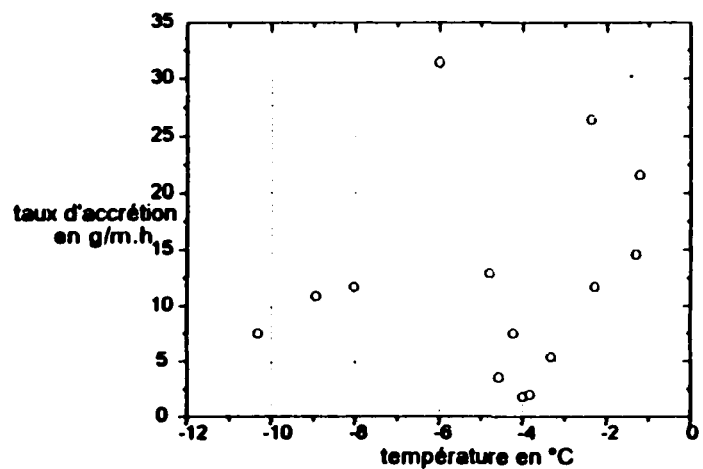


Figure 34.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

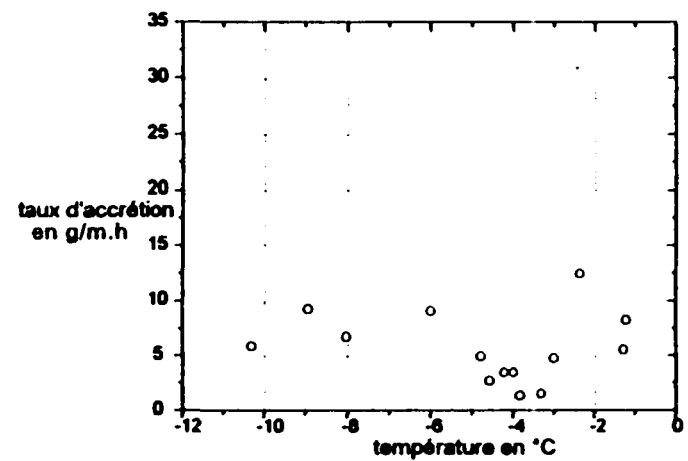


Figure 34.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 34: Relations entre le taux d'accrétion et la température dans le cas des mélanges

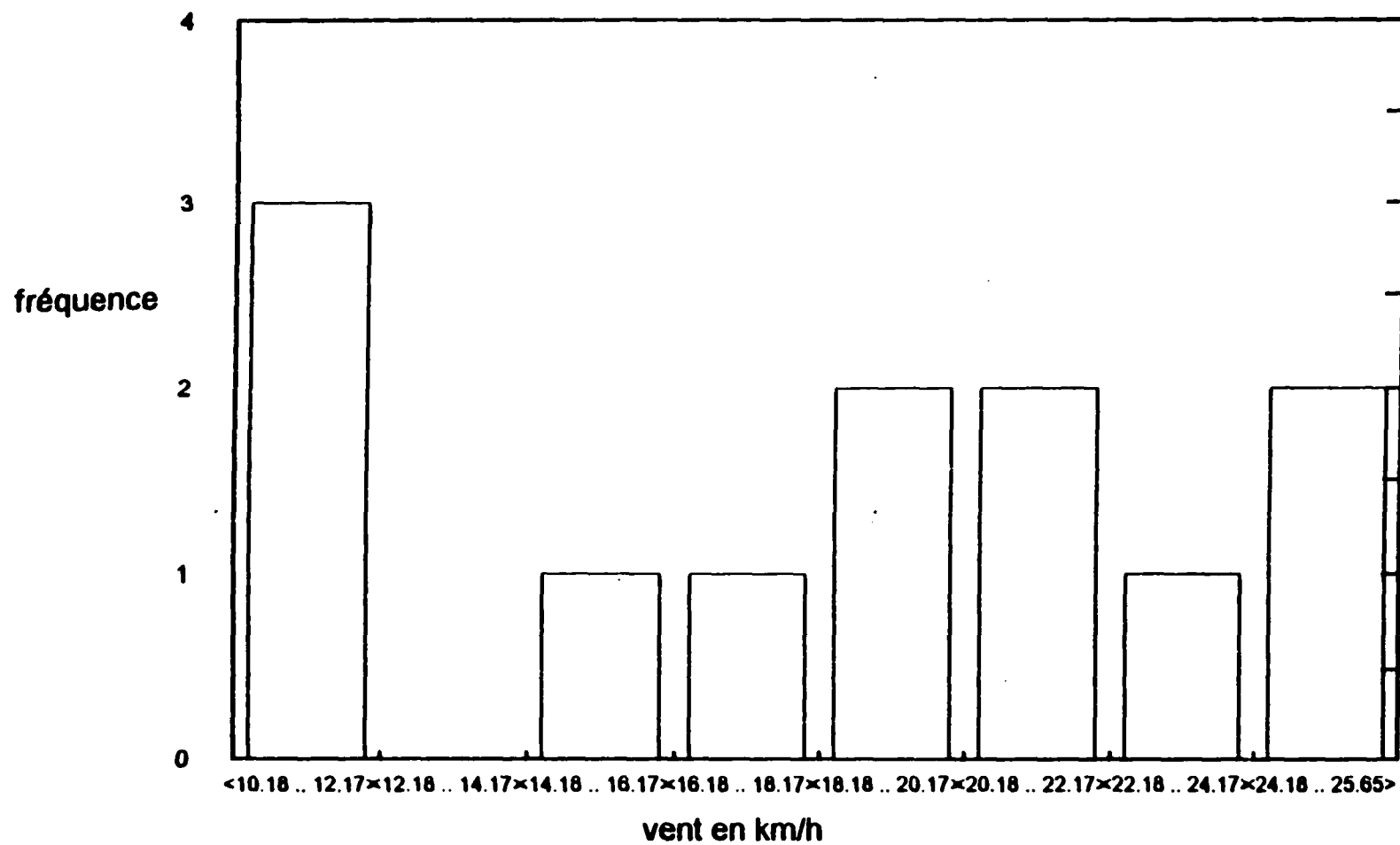


Figure 35: Distribution de la vitesse du vent perpendiculaire dans le cas des mélanges (câble de garde)

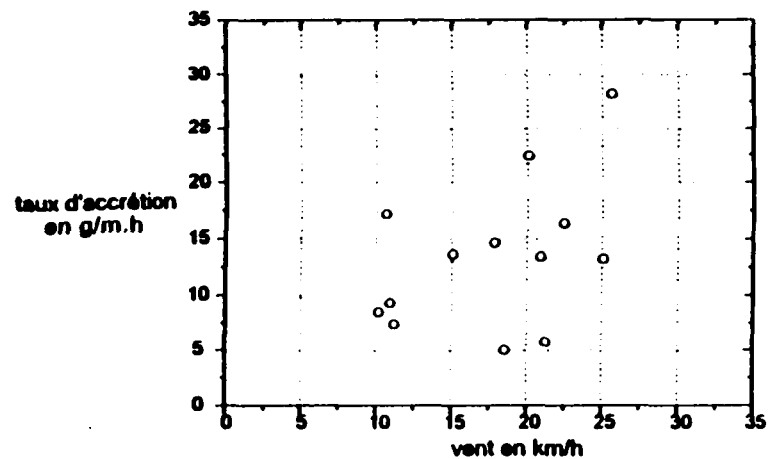


Figure 36.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

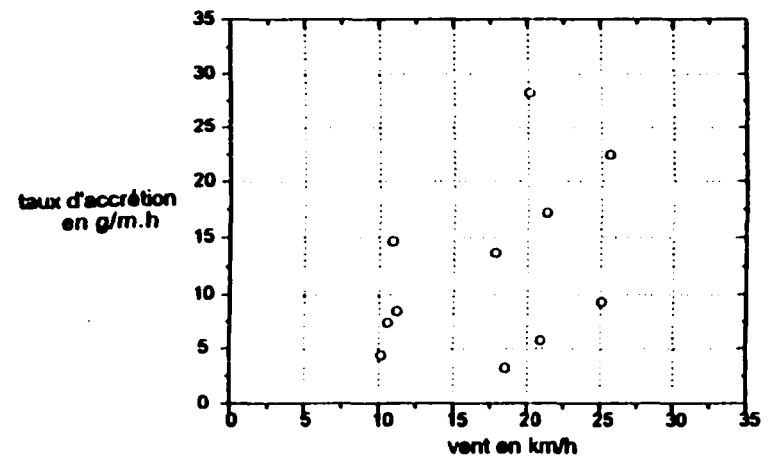


Figure 36.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

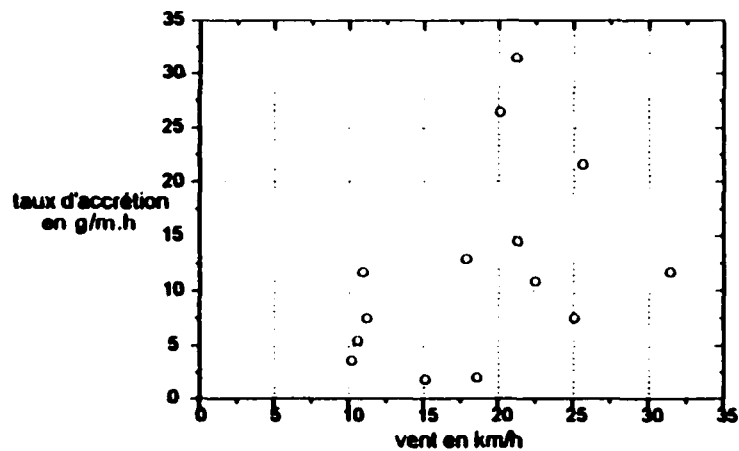


Figure 36.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

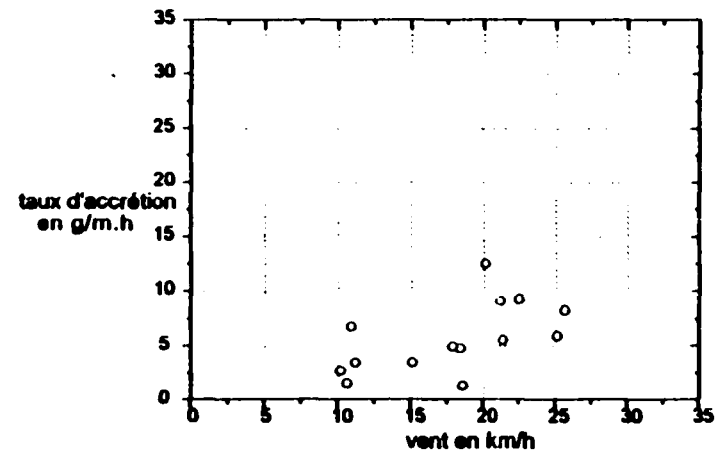


Figure 36.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 36: Relations entre la vitesse perpendiculaire du vent et le taux d'accrétion dans le cas des mélanges

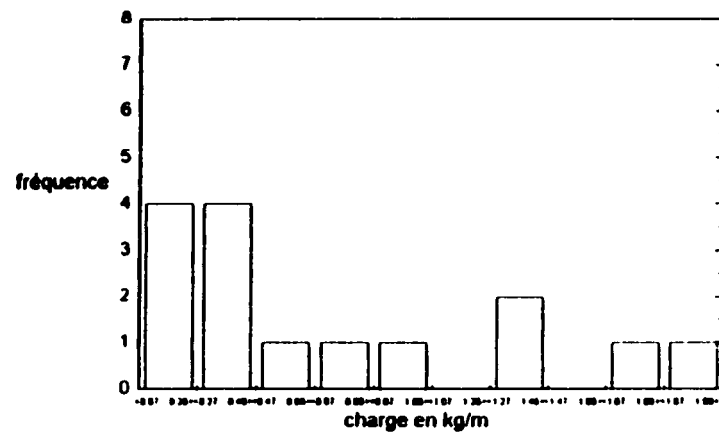


Figure 37.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

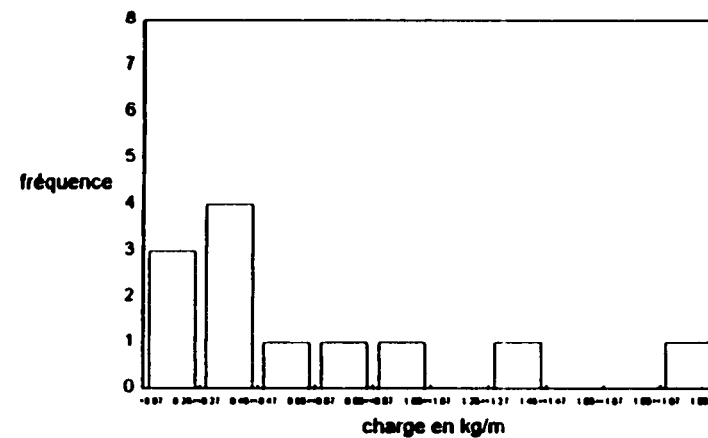


Figure 37.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

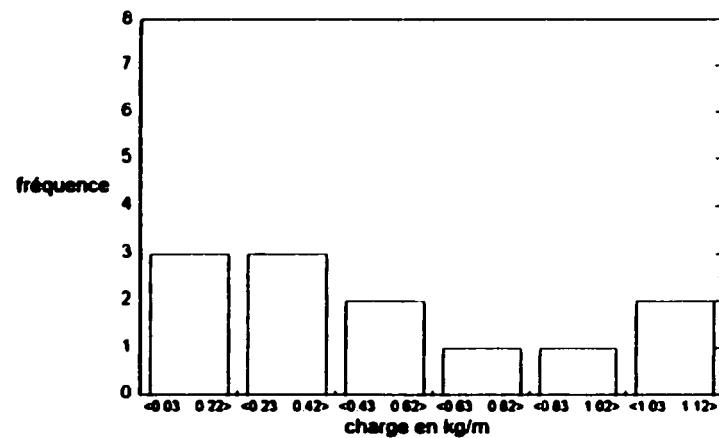


Figure 37.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

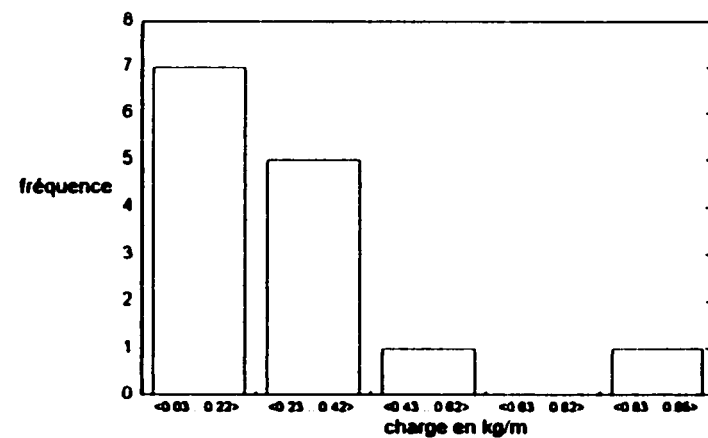


Figure 37.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 37: Distributions de la charge de glace en fin de phase d'accrétion dans le cas des mélanges



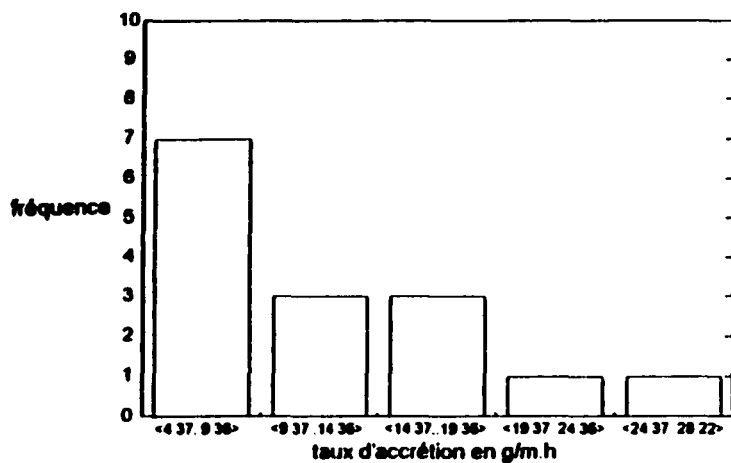


Figure 39.a: Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

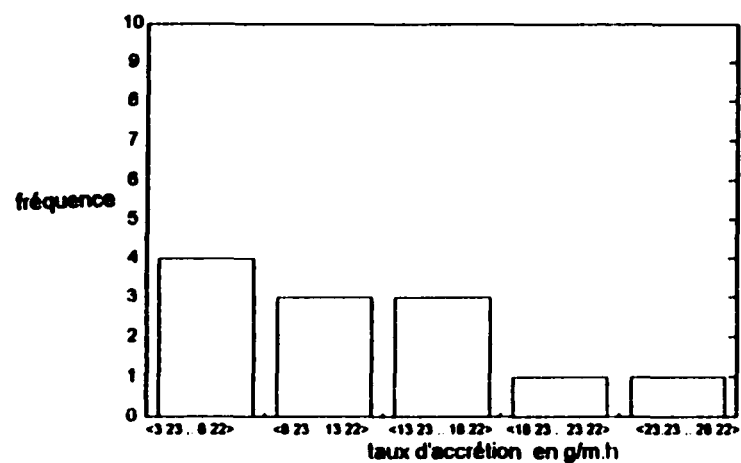


Figure 39.b: Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

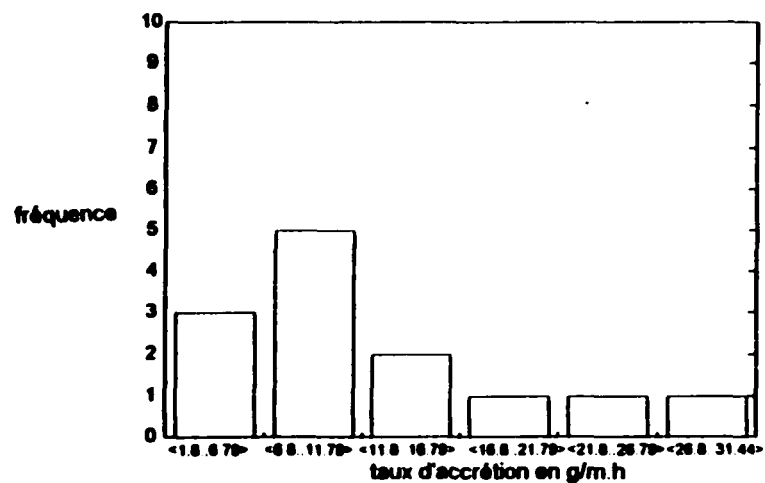


Figure 39.c: Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

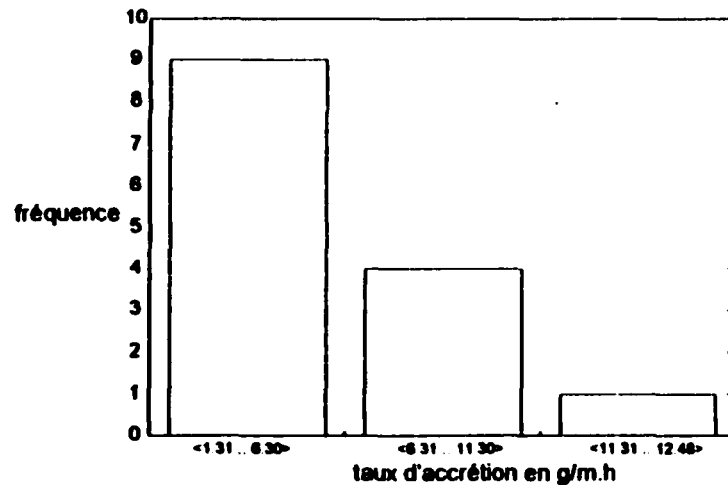


Figure 39.d: Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 39: Distributions du taux d'accrétion dans le cas des mélanges