

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

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

**PAR
SOPHIE GOUZY**

**ANALYSE DE LA PHASE DE MAINTIEN DE DIFFÉRENTS TYPES
DE GLACE ATMOSPHÉRIQUE SUR DES CÂBLES**

DÉCEMBRE 2002



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.

*“On ne voit bien qu’avec le cœur.
L’essentiel est invisible pour les yeux.”*

*Antoine de Saint-Exupéry,
Le Petit Prince.*

À tous mes proches.

RÉSUMÉ

Les réseaux de transmissions électriques et de télécommunications des pays froids sont soumis à des conditions météorologiques extrêmes caractérisées par des tempêtes de givre ou de verglas. En janvier 1998, la région de Montréal (Québec, Canada) a été paralysée par une tempête de verglas d'une durée exceptionnelle entraînant la rupture mécanique de nombreux câbles de transport d'électricité et même de lignes.

Un site de givrage naturel comportant deux lignes électriques expérimentales sur le Mont Valin, au nord de Chicoutimi (Québec, Canada), fournit une base de données contenant douze saisons de givrage, de la saison 86-87 à la saison 97-98. Ces lignes expérimentales ne sont pas alimentées en courant électrique. La première ligne installée sur le site est un câble témoin d'une portée de 31,4 mètres. La seconde, appelée ligne expérimentale, est composée d'un câble de garde, d'un câble Bersimis et d'un faisceau de quatre conducteurs Bersimis. Sa portée est de 96,515 mètres.

Chaque saison de givrage se décompose en événements de glace atmosphérique, un événement pouvant comprendre trois phases successives: une phase d'accrétion de la glace, une phase de maintien de la glace et une phase de délestage de la glace. La phase de maintien de la glace est un concept nouveau qu'il faut définir clairement à l'aide de critères. Cette phase caractérise l'état de stabilité de la glace qui se maintient de façon aléatoire sur les câbles. En général, cette phase est la plus longue des trois phases; elle peut durer de quelques heures à quelques mois.

Nous distinguons habituellement trois grands types de glace d'origine atmosphérique susceptibles d'entraîner des surcharges importantes sur les lignes aériennes par dépôt et formation éventuelle de manchons autour des conducteurs : le givre, le verglas et la neige mouillée. Dans l'atmosphère, les nuages, constitués de très petites gouttelettes d'eau et parfois de cristaux de glace, sont à l'origine de la formation de la glace atmosphérique. Sur le site du Mont Valin, les câbles sont principalement recouverts de dépôts de givre et de verglas, parfois de neige mouillée. La neige mouillée doit être différenciée de la neige sèche. Pour le verglas et le givre, la rigidité en torsion d'un conducteur ou d'un câble a un effet sur la quantité de glace qui peut s'y déposer et sur la forme du manchon de glace. Sur un conducteur toronné, la rigidité en torsion du conducteur influence la forme axiale ou cylindrique de l'accumulation de neige alors que la rigidité en torsion n'a aucun effet sur un conducteur lisse recouvert de neige.

Des critères ont été définis afin d'identifier le début et la fin de la phase de maintien de chaque événement des douze saisons de givrage et afin d'identifier les différents types de glace (givre, verglas, neige mouillée) et les mélanges de ces types de glace présents sur les câbles pendant la phase de maintien. Dans le cas des mélanges, l'ordre successif de formation de chaque type de glace (givre, verglas, neige mouillée) a été pris en compte.

L'utilisation de ces critères a permis de créer une base de données sur Excel pour chaque type de câble, donc pour le câble Bersimis, le câble du faisceau, le câble de garde et le câble témoin. Ces données se rapportent à la phase de maintien et à la charge maximale atteinte pendant la phase de maintien pour 75 événements du câble Bersimis, 75 événements du câble du faisceau, 85 événements du câble de garde et 62 événements du câble témoin. Quatorze mélanges ont été identifiés.

Une analyse de régression multiple a été réalisée sur la charge de glace maximale des événements pendant la phase de maintien en fonction des variables suivantes : le type de glace ou de mélange correspondant à la charge maximale, la durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte, la charge de glace en fin de phase d'accrétion et le taux d'accrétion moyen pendant la phase d'accrétion. Le résultat attendu est de savoir, à partir de l'analyse de régression linéaire, quels paramètres influencent le plus la formation de la charge maximale d'un événement de glace atmosphérique. Une description statistique de la charge maximale a aussi été effectuée par type de câble et par type de glace et de mélange.

La phase de maintien a été analysée en considérant les paramètres suivants : les types de glace et les mélanges présents sur les câbles pendant la phase de maintien, la température moyenne de l'air pendant la phase de maintien, la variation de la charge de glace pendant la phase de maintien, la vitesse moyenne et maximale du vent perpendiculaire à la ligne expérimentale pendant la phase de maintien, la durée de la phase de maintien, les délestages de glace pendant la phase de maintien et les types de délestages en fin de phase de maintien.

En conclusion, l'analyse de régression a montré que le type de glace ou de mélange correspondant à la charge maximale n'a pas d'influence sur la valeur de la charge maximale. La durée de la phase de maintien diffère d'un câble à l'autre. Ceci est lié au fait que les charges de glace maximales et les délestages de glace diffèrent d'un câble à l'autre. L'analyse statistique est un outil très intéressant qu'il faut savoir interpréter avec précaution en tenant toujours compte des phénomènes physiques qui se rapportent au sujet traité.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Monsieur Jacques Druez, pour la disponibilité, l'intérêt et la confiance qu'il a témoignés tout au long de ce projet.

Je remercie Messieurs Jacques Carignan et Guy Archambault d'avoir accepté de faire partie de mon jury. Je leur suis reconnaissante pour leur soutien et les nombreux conseils techniques qu'ils m'ont donnés.

Mes remerciements vont à Madame Sylvie Bernardin pour son aide. Elle a participé vivement à l'élaboration de ce projet en partageant des connaissances de qualité sur le domaine de l'ingénierie de la glace.

Ce projet n'aurait pas vu le jour sans l'aide de Messieurs Marco Boudreault, Serge Gauthier et Louis-Michel Gagnier. Je tiens donc à les remercier chaleureusement.

Enfin, je remercie mon ami et confident de tous les jours, Monsieur Christophe Portaix, pour ses encouragements et sa patience.

TABLE DES MATIÈRES

	TITRE.....	i
	RÉSUMÉ.....	iii
	REMERCIEMENTS.....	vi
	TABLE DES MATIÈRES.....	vii
	LISTE DES TABLEAUX.....	xiii
	LISTE DES FIGURES.....	xvi
	INTRODUCTION.....	1
I	PRÉSENTATION DU SITE DE GIVRAGE NATUREL.....	2
	I-1. PROBLÉMATIQUE.....	2
	I-2. DESCRIPTION DU SITE.....	3
	I-3. INSTRUMENTATION.....	5
	I-3-1. Thermistor.....	6
	I-3-2. Givromètre.....	6
	I-3-3. Pluviomètre.....	7
	I-3-4. Anémomètre.....	8
	I-3-5. Girouette.....	8
	I-3-6. Cellules de charge.....	8
	I-3-7. Vidéo caméra.....	10
II	ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES...	11
	II-1. INTRODUCTION.....	11
	II-2. SYSTÈME D'ACQUISITION.....	12
	II-3. TRANSFERT DES DONNÉES.....	13
	II-4. INSERTION DES DONNÉES SUR MICRO-VAX.....	14
	II-5. TRAITEMENT DES DONNÉES SUR EXCEL.....	14
	II-6. CALCUL DE LA CHARGE DE GLACE PAR UNITÉ DE LONGUEUR.....	16

II-6-1. Équation de la charge de glace en fonction de la tension mécanique.....	16
II-6-2. Équation de la tension mécanique en fonction de la cellule de charge.....	19
II-6-3. Facteurs de conversion des conducteurs.....	20
II-6-4. Facteurs de conversion des isolateurs.....	21
II-7. VITESSE DU VENT.....	23
II-7-1. Facteur de conversion pour l'anémomètre.....	23
II-7-2. Formulation de la vitesse du vent perpendiculaire.....	24
II-8. DÉCALAGES DE LA MACRO-COMMANDE.....	25
II-9. TRAVAIL EFFECTUÉ DANS LE CADRE DE NOTRE ÉTUDE.....	26
III LE MAINTIEN DE LA GLACE SUR UN CÂBLE.....	29
III-1. DÉCOMPOSITION D'UN ÉVÉNEMENT DE GLACE ATMOSPHERIQUE.....	29
III-2. DÉFINITION DE LA PHASE DE MAINTIEN.....	31
III-3. PROBLÉMATIQUE DU MAINTIEN.....	32
III-4. LA DURÉE DE LA PHASE DE MAINTIEN.....	33
III-5. LA CHARGE MAXIMALE PENDANT LA PHASE DE MAINTIEN.....	34
III-6. ACCRÉTION DE LA GLACE SUR LES CÂBLES.....	35
III-7. TYPES DE DÉLESTAGE.....	36
III-7-1. Délestage par fonte.....	37
III-7-2. Délestage par bris mécanique.....	37
III-7-3. Délestage par sublimation.....	38
III-7-4. Délestage mécanique amorcé par fonte.....	38
III-8. SITES EN MILIEU NATUREL.....	39
IV INTRODUCTION À LA GLACE ATMOSPHERIQUE.....	40
IV-1. GÉNÉRALITÉS.....	40
IV-2. CLASSIFICATION DES TYPES DE GLACE ATMOSPHERIQUE.....	41
IV-3. LA NEIGE.....	43
IV-3-1. Dépôts de glace et de neige au Mont Valin.....	43
IV-3-2. Terminologie.....	43
IV-3-3. Définition.....	44
IV-3-4. La neige collante.....	44
IV-3-5. Théorie de la neige sèche et de la neige mouillée.....	45
IV-3-6. Conclusion.....	45
IV-3-7. Masse volumique de la neige.....	46
IV-4. FORMATION DE LA GLACE ATMOSPHERIQUE.....	46
IV-4-1. Les nuages dans l'atmosphère.....	46

	IV-4-1-1. Formation des nuages.....	46
	IV-4-1-2. Structure des nuages.....	48
	IV-4-2. Germination des cristaux de glace.....	48
	IV-4-3. Formation des cristaux de glace atmosphérique.....	50
	IV-4-4. Genèse des précipitations.....	50
	IV-4-4-1. Mécanisme de Langmuir.....	50
	IV-4-4-2. Mécanisme de Bergeron.....	51
V	PROPRIÉTÉS DE LA GLACE ATMOSPHÉRIQUE SUR UN CONDUCTEUR CYLINDRIQUE.....	53
	V-1: RIGIDITÉ EN TORSION DU CONDUCTEUR.....	53
	V-1-1. Forme du dépôt de glace.....	53
	V-1-2. Forme du dépôt de neige mouillée.....	54
	V-1-2-1. Cas du conducteur toronné.....	54
	V-1-2-2. Cas du conducteur lisse.....	55
	V-2. ADHÉRENCE DE LA GLACE ET DE LA NEIGE.....	55
	V-2-1. Modes de rupture de la glace.....	56
	V-2-2. Théories de l'adhérence de la neige mouillée.....	56
	V-3. BILAN THERMODYNAMIQUE.....	57
VI	CRITÈRES D'IDENTIFICATION DE LA PHASE DE MAINTIEN.....	62
	VI-1. CRITÈRE DE DÉBUT DE PHASE DE MAINTIEN.....	62
	VI-1-1. Énoncé du critère.....	62
	VI-1-2. Exemples.....	64
	VI-2. CRITÈRE DE FIN DE PHASE DE MAINTIEN.....	64
	VI-2-1. Événements avec phase de délestage.....	65
	VI-2-1-1. Énoncé du critère.....	65
	VI-2-1-2. Exemples.....	66
	VI-2-1-3. Cas particulier.....	66
	VI-2-2. Événements sans phase de délestage.....	67
	VI-2-2-1. Observations.....	67
	VI-2-2-2. Énoncé du critère.....	68
	VI-2-2-3. Exemples.....	68
	VI-3. IDENTIFICATION DE DEUX ÉVÉNEMENTS INDÉPENDANTS.....	70
	VI-4. IDENTIFICATION DE LA SUBLIMATION PENDANT LA PHASE DE MAINTIEN.....	72
VII	CRITÈRES D'IDENTIFICATION DES TYPES DE GLACE ET DES MÉLANGES PENDANT LA PHASE DE MAINTIEN.....	73

VII-1. IDENTIFICATION DU GIVRE, DU VERGLAS ET DE LA NEIGE MOUILLÉE.....	73
VII-1-1. Différenciation du givre et du verglas.....	73
VII-1-2. Identification de la neige mouillée.....	75
VII-2. LES TAUX D'ACCRETION PAR TYPE DE GLACE.....	75
VII-2-1. Classification distincte du verglas et de la neige mouillée.....	76
VII-2-1-1. Accrétion de neige mouillée.....	76
VII-2-1-2. Accrétion de verglas.....	80
VII-2-2. Présentation des résultats.....	81
VII-2-2-1. Caractéristiques du taux d'accrétion.....	81
VII-2-2-1-1. Valeur maximale du taux d'accrétion.....	82
VII-2-2-1-2. Valeur minimale du taux d'accrétion.....	82
VII-2-2-1-3. Valeur moyenne du taux d'accrétion.....	83
VII-2-2-2. Distribution du taux d'accrétion.....	84
VII-3. TRANSFORMATION DE LA GLACE SUR LE CÂBLE.....	85
VII-4. IDENTIFICATION DES MÉLANGES PENDANT LA PHASE DE MAINTIEN.....	86
VIII PRÉSENTATION DE LA BASE DE DONNÉES	88
VIII-1. SÉLECTION DES ÉVÉNEMENTS PERTINENTS.....	88
VIII-2. NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS CONSIDÉRÉS.....	89
VIII-3. TYPES DE GLACE ET DE MÉLANGE IDENTIFIÉS.....	90
VIII-4. DÉFINITION DU COEFFICIENT DE VARIATION.....	92
VIII-5. IDENTIFICATION DES PHASES DE MAINTIEN.....	93
IX ANALYSE STATISTIQUE DES CHARGES MAXIMALES.....	94
IX-1. RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE.....	94
IX-1-1. Équation de régression.....	94
IX-1-2. Variables de régression.....	96
IX-1-3. Présentation des données.....	97
IX-1-3-1. Fréquence des types de glace et de mélange par câble.....	97
IX-1-3-2. Distributions des variables de régression.....	100
IX-1-3-3. Relations entre les variables de régression.....	101
IX-1-4. Résultats.....	102
IX-1-4-1. Coefficients de corrélation.....	102
IX-1-4-2. Résultats de la régression.....	105
IX-1-4-3. Discussion.....	109
IX-1-4-4. Nouveaux calculs de régression.....	110
IX-1-4-5. Écart-type des résidus.....	112
IX-1-4-6. Conclusion des régressions.....	113

IX-2. DESCRIPTION STATISTIQUE DE LA CHARGE MAXIMALE.....	113
IX-2-1. Répartition par câble.....	113
IX-2-2. Répartition par type de glace et de mélange.....	114
IX-2-3. Position de la charge maximale dans la phase de maintien.....	116
IX-2-4. Prévion des valeurs de charge maximale.....	118
IX-2-5. Coefficient de corrélation entre la charge maximale et la vitesse du vent.....	120
X ANALYSE DE LA PHASE DE MAINTIEN DE LA GLACE.....	122
X-1. INTRODUCTION.....	122
X-2. TYPES DE GLACE ET DE MÉLANGE PENDANT LA PHASE DE MAINTIEN.....	123
X-2-1. Fréquence des types de glace et de mélange par câble.....	123
X-2-2. Distribution des types de glace et de mélange par câble.....	125
X-3. TEMPÉRATURE PENDANT LA PHASE DE MAINTIEN.....	125
X-3-1. Caractéristiques de la température par type de glace et de mélange	125
X-3-2. Distribution de la température moyenne.....	127
X-4. CHARGE DE GLACE ET VITESSE DU VENT.....	128
X-4-1. Charge de glace pendant la phase de maintien.....	128
X-4-1-1. Distribution de la charge de glace.....	128
X-4-1-2. Coefficient de variation par type de glace et de mélange.....	129
X-4-2. Vitesse moyenne et maximale du vent pendant la phase de maintien.....	131
X-4-2-1. Distribution de la vitesse moyenne.....	131
X-4-2-2. Distribution de la vitesse maximale.....	131
X-4-3. Charge de glace et vitesse du vent.....	131
X-4-3-1. Coefficient de corrélation.....	131
X-4-3-2. Relation entre la charge de glace et la vitesse du vent au carré.....	132
X-5. DURÉE DE LA PHASE DE MAINTIEN.....	132
X-5-1. Caractéristiques de la durée de la phase de maintien par type de glace et de mélange.....	132
X-5-2. Distribution de la durée de la phase de maintien.....	138
X-5-3. Coefficient de corrélation entre la durée et les variables.....	138
X-5-4. Relations entre la durée et les variables.....	141
X-6. DÉLESTAGES PENDANT LA PHASE DE MAINTIEN.....	142
X-7. TYPES DE DÉLESTAGE EN FIN DE PHASE DE MAINTIEN.....	144
X-7-1. Distribution des types de délestage en fin de phase de maintien....	144
X-7-2. Conditions de formation du délestage par bris mécanique en fin de phase de maintien.....	145

X-7-3. Coefficient de corrélation entre le type de délestage et le type de glace ou mélange.....	147
X-8. CONCLUSION.....	148
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	151
BIBLIOGRAPHIE.....	154
ANNEXE A : Tableaux 16 à 19, 39, 41 à 44, 46 à 48, 50, 53, 55.....	A-1
ANNEXE B : Figures 1 à 81.....	B-1

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :	Caractéristiques des câbles.....	4
Tableau 2 :	Caractéristiques des cellules de charge.....	9
Tableau 3 :	Facteurs de conversion des conducteurs.....	21
Tableau 4 :	Facteurs de conversion des isolateurs.....	23
Tableau 5 :	Insertion des décalages dans la macro-commande.....	26
Tableau 6 :	Récapitulatif des saisons.....	28
Tableau 7 :	Identification de la fin de la phase de maintien (câble Bersimis), événement du 18 au 20 décembre 1995.....	69
Tableau 8 :	Identification de la fin de la phase de maintien (câble Bersimis), événement de janvier à février 1993.....	70
Tableau 9 :	Accrétion de neige mouillée (octobre 1992).....	77
Tableau 10 :	Accrétion de neige mouillée (novembre 1992).....	77
Tableau 11 :	Accrétion de neige mouillée (octobre 1994).....	78
Tableau 12 :	Accrétion de verglas (novembre 1992).....	80
Tableau 13 :	Caractéristiques du taux d'accrétion en g/m.h.....	81
Tableau 14 :	Nombre d'événements par type de câble.....	89
Tableau 15 :	Types de glace ou de mélange identifiés dans notre étude.....	90
Tableau 16 :	Identification des phases de maintien.....	A-2
Tableau 17 :	Identification des valeurs de la charge maximale.....	A-11
Tableau 18 :	Identification des types de délestage en fin de phase de maintien....	A-20
Tableau 19 :	Fréquence des types de glace et de mélange associés à la charge maximale.....	A-29
Tableau 20 :	Coefficients de corrélation sur le câble Bersimis.....	102
Tableau 21 :	Coefficients de corrélation sur le câble du faisceau.....	103
Tableau 22 :	Coefficients de corrélation sur le câble de garde.....	103
Tableau 23 :	Coefficients de corrélation sur le câble témoin.....	103
Tableau 24 :	Ordre décroissant des coefficients de corrélation avec la charge maximale sur chaque type de conducteur.....	104
Tableau 25 :	Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale pour le câble Bersimis.....	106
Tableau 26 :	Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale pour le câble du faisceau.....	106
Tableau 27 :	Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale pour le câble de garde.....	107
Tableau 28 :	Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale pour le câble témoin.....	107

Tableau 29 :	Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale en supprimant la variable X_4 pour le câble Bersimis.....	110
Tableau 30 :	Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale en supprimant la variable X_4 pour le câble du faisceau...	110
Tableau 31 :	Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale en supprimant la variable X_4 pour le câble de garde.....	110
Tableau 32 :	Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale en supprimant la variable X_4 pour le câble témoin.....	111
Tableau 33 :	Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale en supprimant la variable X_3 pour le câble Bersimis.....	111
Tableau 34 :	Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale en supprimant la variable X_3 pour le câble du faisceau...	111
Tableau 35 :	Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale en supprimant la variable X_3 pour le câble de garde.....	112
Tableau 36 :	Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale en supprimant la variable X_3 pour le câble témoin.....	112
Tableau 37 :	Écart-type des résidus S_r en kg/m.....	113
Tableau 38 :	Répartition des valeurs de charge maximale par type de câble en kg/m des saisons de 1990-1991 à 1997-1998.....	114
Tableau 39 :	Caractéristiques de la charge maximale en kg/m.....	A-30
Tableau 40 :	Position de la charge maximale dans la phase de maintien.....	117
Tableau 41 :	Classification des valeurs de charge maximale sur le câble Bersimis.....	A-31
Tableau 42 :	Classification des valeurs de charge maximale sur le câble du faisceau.....	A-32
Tableau 43 :	Classification des valeurs de charge maximale sur le câble de garde.....	A-33
Tableau 44 :	Classification des valeurs de charge maximale sur le câble témoin.....	A-34
Tableau 45 :	Coefficients de corrélation entre la charge maximale en kg/m et la vitesse du vent perpendiculaire au carré en km^2/h^2	121
Tableau 46 :	Fréquence des types de glace et des mélanges pendant la phase de maintien.....	A-35
Tableau 47 :	Caractéristiques de la température moyenne en $^{\circ}\text{C}$ pendant la phase de maintien.....	A-36
Tableau 48 :	Caractéristiques du coefficient de variation de la charge de glace en % pendant la phase de maintien.....	A-37
Tableau 49 :	Coefficients de corrélation entre le coefficient de variation de la charge de glace et la vitesse moyenne du vent perpendiculaire en km/h et en km^2/h^2	131
Tableau 50 :	Caractéristiques de la durée de la phase de maintien en heures.....	A-38

Tableau 51 :	Coefficients de corrélation entre la durée de la phase de maintien et les variables pendant la phase de maintien.....	139
Tableau 52 :	Coefficient de corrélation entre le type de glace ou de mélange et la température moyenne pendant la phase de maintien en h.....	140
Tableau 53 :	Identification des délestages pendant la phase de maintien.....	A-39
Tableau 54 :	Type de déstage en fin de phase de maintien.....	145
Tableau 55 :	Conditions de formation du déstage par bris mécanique en fin de phase de maintien.....	A-47
Tableau 56 :	Coefficient de corrélation entre le type de déstage et le type de glace ou de mélange.....	148

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Description de la station de givrage du Mont Valin.....	B-2
Figure 2 :	Caractéristiques de la ligne expérimentale.....	B-3
Figure 3 :	Caractéristiques du poteau numéro 1.....	B-4
Figure 4 :	Caractéristiques de la ligne témoin.....	B-5
Figure 5 :	Schéma technique du givromètre.....	B-6
Figure 6 :	Instrumentation de la station du Mont Valin.....	B-7
Figure 7 :	Câble soumis aux tensions mécaniques et au poids de la glace.....	B-8
Figure 8 :	Deux événements comprenant les trois phases successives (câble Bersimis, octobre 1993).....	B-9
Figure 9 :	Événement comprenant les trois phases successives (câble de garde, octobre 1997).....	B-10
Figure 10 :	Événement comprenant les trois phases successives (câble Bersimis, janvier 1993).....	B-11
Figure 11 :	Événement comprenant les trois phases successives (câble de garde, avril 1995).....	B-12
Figure 12 :	Événement comprenant les trois phases successives (câble Bersimis, janvier 1998).....	B-13
Figure 13 :	Événement de verglas, le 21 octobre 1993 (câble Bersimis).....	B-14
Figure 14 :	Événement de verglas, le 9 mars 1998 (câble de garde).....	B-15
Figure 15 :	Événement de verglas, le 12 avril 1995 (un câble du faisceau).....	B-16
Figure 16 :	Événement sans phase de délestage (câble Bersimis, décembre 1995)...	B-17
Figure 17 :	Événement sans phase de délestage (câble Bersimis, février 1998).....	B-18
Figure 18 :	Événement sans phase de délestage (câble Bersimis, mars 1998).....	B-19
Figure 19 :	Relation entre les types de glace et les conditions météorologiques de formation.....	B-20
Figure 20 :	Conditions météorologiques de l'accrétion de neige sur un câble.....	B-21
Figure 21 :	Cristal de glace entouré de gouttelettes d'eau surfondues.....	B-21
Figure 22 :	Effet de la rigidité en torsion sur la forme du dépôt de glace.....	B-22
Figure 23 :	Accrétion axiale de neige mouillée sur un conducteur toronné à forte rigidité en torsion.....	B-23
Figure 24 :	Accrétion cylindrique de neige mouillée sur un conducteur toronné à faible rigidité en torsion.....	B-23
Figure 25 :	Glissement et rotation de neige mouillée sur un conducteur lisse.....	B-24
Figure 26 :	Dépôt de glace sur un conducteur cylindrique tournant.....	B-24
Figure 27 :	Identification du début de la phase de maintien (câble de garde, octobre 1993).....	B-25

Figure 28 : Identification du début de la phase de maintien (câble de garde, octobre 1997).....	B-26
Figure 29 : Identification du début de la phase de maintien (câble Bersimis, février 1994).....	B-27
Figure 30 : Identification de la fin de la phase de maintien (câble Bersimis, octobre 1993).....	B-28
Figure 31 : Identification de la fin de la phase de maintien (câble de garde, février 1996).....	B-29
Figure 32 : Identification de la fin de la phase de maintien (câble de garde, avril 1995).....	B-30
Figure 33 : Identification de la fin de la phase de maintien (câble de garde, mars 1996).....	B-31
Figure 34 : Identification de la fin de la phase de maintien (câble de garde, février 1995).....	B-32
Figure 35 : Identification de la fin de la phase de maintien (câble de garde, février 1994).....	B-33
Figure 36 : Identification de la fin de la phase de maintien (câble de garde, novembre 1995).....	B-34
Figure 37 : Phase de maintien du 19 au 20 décembre 1995 (câble Bersimis).....	B-35
Figure 38 : Phase de maintien du 23 janvier au 2 février 1993 (câble Bersimis).....	B-36
Figure 39 : Identification de deux événements indépendants (câble de garde, décembre 1992 et janvier 1993).....	B-37
Figure 40 : Identification de deux événements indépendants (câble de garde, décembre 1996).....	B-38
Figure 41 : Identification de deux événements indépendants (câble Bersimis, décembre 1996).....	B-39
Figure 42 : Période de sublimation de 2 au 11 février 1997 (câble Bersimis).....	B-40
Figure 43 : Période de sublimation de 2 au 11 février 1997 (câble Bersimis).....	B-41
Figure 44 : Distribution du taux d'accrétion dans le cas du givre (saisons 1992-1993, 1993-1994 et 1994-1995).....	B-42
Figure 45 : Distribution du taux d'accrétion dans le cas du verglas (saisons 1992-1993, 1993-1994 et 1994-1995).....	B-43
Figure 46 : Distribution du taux d'accrétion dans le cas de la neige mouillée (saisons 1992-1993, 1993-1994 et 1994-1995).....	B-44
Figure 47 : Câbles recouverts de glace sur la ligne expérimentale du Mont Valin...	B-45
Figure 48 : Manchon de glace.....	B-46
Figure 49 : Manchon de glace.....	B-47
Figure 50 : Phase de maintien du 19 au 23 avril 1993 (câble de garde).....	B-48
Figure 51 : Distribution de la charge maximale.....	B-49
Figure 52 : Distribution du type de glace ou de mélange correspondant à la charge maximale.....	B-50

Figure 53 : Distribution de la durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte	B-51
Figure 54 : Distribution de la charge de glace en fin de phase d'accrétion.....	B-52
Figure 55 : Distribution du taux d'accrétion moyen pendant la phase d'accrétion...	B-53
Figure 56 : Relation entre la charge maximale et les variables indépendantes sur le câble Bersimis.....	B-54
Figure 57 : Relation entre la charge maximale et les variables indépendantes sur le câble du faisceau.....	B-55
Figure 58 : Relation entre la charge maximale et les variables indépendantes sur le câble de garde.....	B-56
Figure 59 : Relation entre la charge maximale et les variables indépendantes sur le câble témoin.....	B-57
Figure 60 : Relations entre les variables indépendantes sur le câble Bersimis.....	B-58
Figure 61 : Relations entre les variables indépendantes sur le câble du faisceau.....	B-59
Figure 62 : Relations entre les variables indépendantes sur le câble de garde.....	B-60
Figure 63 : Relations entre les variables indépendantes sur le câble témoin.....	B-61
Figure 64 : Position de la charge maximale dans la phase de maintien.....	B-62
Figure 65 : Relation entre la charge maximale et la vitesse du vent perpendiculaire au carré relative à la charge maximale.....	B-63
Figure 66 : Distribution du type de glace ou mélange pendant la phase de maintien	B-64
Figure 67 : Distribution de la température moyenne pendant la phase de maintien..	B-65
Figure 68 : Distribution du coefficient de variation de la charge de glace pendant la phase de maintien.....	B-66
Figure 69 : Distribution de la moyenne de la charge de glace pendant la phase de maintien.....	B-67
Figure 70 : Distribution de la médiane de la charge de glace pendant la phase de maintien.....	B-68
Figure 71 : Distribution de la charge de glace minimale pendant la phase de maintien.....	B-69
Figure 72 : Distribution de la vitesse moyenne du vent perpendiculaire pendant la phase de maintien.....	B-70
Figure 73 : Distribution de la vitesse maximale du vent perpendiculaire pendant la phase de maintien.....	B-71
Figure 74 : Relation entre le coefficient de variation et la vitesse moyenne du vent perpendiculaire au carré.....	B-72
Figure 75 : Distribution de la durée de la phase de maintien en heures.....	B-73
Figure 76 : Relation entre la durée de la phase de maintien et le type de glace ou mélange pendant la phase de maintien.....	B-74
Figure 77 : Relation entre la durée de la phase de maintien et la température moyenne pendant la phase de maintien.....	B-75
Figure 78 : Relation entre la durée de la phase de maintien et le coefficient de variation de la charge de glace pendant la phase de maintien.....	B-76

Figure 79 : Relation entre la durée de la phase de maintien et la vitesse moyenne du vent perpendiculaire au carré pendant la phase de maintien.....	B-77
Figure 80 : Relation entre la durée de la phase de maintien et la durée de la phase d'accrétion.....	B-78
Figure 81 : Distribution des types de délestage en fin de phase de maintien.....	B-79

INTRODUCTION

Le maintien des dépôts de glace est un paramètre qui a été négligé, dans le passé, en faveur de l'accumulation de la glace ou du délestage de la glace (Laflamme, 1998). En janvier 1998, la région de Montréal (Québec, Canada) a été paralysée par une tempête de pluie verglaçante d'une durée exceptionnelle entraînant la rupture mécanique de nombreux câbles de transport d'électricité et même de lignes (Jones and Mulherin, 1998). Ceci démontre le besoin urgent d'étudier le maintien de la glace atmosphérique sur les câbles et de définir un nouveau concept : la phase de maintien. Cette phase se situe entre la phase d'accrétion et la phase de délestage. C'est souvent pendant la phase de maintien qu'apparaissent les charges extrêmes de glace sur les câbles. Par ailleurs, il est intéressant d'étudier la phase de maintien en tenant compte des types de glace et de mélange présents sur les câbles pendant cette phase.

Le premier objectif de cette étude est de réaliser une base de données à partir des douze saisons de givrage de 86-87 à 97-98 de la station de givrage du Mont Valin (Québec, Canada) pour les quatre types de câble de la station. Il faut définir les critères d'identification de la phase de maintien et les critères d'identification des types de glace et des mélanges présents sur les câbles pendant la phase de maintien. Cette base de données sera utilisée pour analyser statistiquement la phase de maintien et la charge maximale de l'événement de glace atmosphérique atteinte pendant la phase de maintien. Nous allons d'abord réaliser une analyse de régression sur la charge maximale des événements de glace atmosphérique pendant la phase de maintien afin d'identifier le degré d'influence des paramètres liés à la charge maximale. Puis, nous allons effectuer une analyse statistique et descriptive de la phase de maintien.

CHAPITRE I

PRÉSENTATION DU SITE DE GIVRAGE NATUREL

Dans cette première partie, nous présentons de façon générale le site de givrage naturel, ainsi que les caractéristiques techniques des câbles et des instruments de mesure présents sur le site.

I-1. PROBLÉMATIQUE

Le Québec est connu pour son climat très froid et ses longs hivers. En raison de sa grande étendue géographique, principalement du nord au sud, les conditions climatiques et atmosphériques sont très variées d'un endroit à l'autre du Québec.

Ainsi, à Montréal et à Québec, il est très fréquent d'avoir du verglas durant l'hiver. Plus au nord, dans la région du Saguenay, à Chicoutimi, les hivers sont marqués en grande majorité par la présence de givre. C'est pourquoi une station de recherche en milieu naturel a été installée tout près de Chicoutimi dans le but d'étudier le phénomène du givrage sur des conducteurs électriques de différents diamètres. Ce projet a été réalisé initialement à partir d'une collaboration entre l'Équipe de Recherche en Ingénierie du Givrage des Structures (ÉRIGS) de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), Hydro-Québec et Radio-Québec. Cette station bénéficie de conditions atmosphériques extrêmes telles que des températures négatives très basses, propices à la formation de givre sur les structures.

Elle est disposée dans un corridor semi-montagneux perpendiculairement aux vents dominants de directions nord-ouest et sud-est; elle subit l'influence des vents de l'ouest, provenant de la Baie James, de la Baie d'Hudson et aussi de l'Arctique, et des vents de l'est, plus tempérés, provenant du Labrador et du Golfe du Saint-Laurent.

I-2. DESCRIPTION DU SITE

La station de givrage du Mont Valin est installée à 902 mètres d'altitude, sur le sommet des Monts Valin, à 45 kilomètres au nord-est de Chicoutimi, Québec, Canada. Ses coordonnées sont 48° 36' 04" de latitude nord et 70° 49' 46" de longitude ouest. 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 (figure 1), comportant quatre types de conducteurs, soit sept câbles au total. Ces deux lignes ne sont pas alimentées en tension électrique.

La ligne expérimentale (figure 2) est constituée de deux poteaux de bois de 25 mètres de hauteur formant une portée de 96,515 m, orientée à 18 degrés est de la direction nord, de façon à être perpendiculaire aux vents dominants est-ouest. Elle est composée de :

- un câble de garde de 12,5 mm de diamètre,
- un câble de type Bersimis de 35 mm de diamètre,
- un faisceau de quatre conducteurs Bersimis, chacun de 35 mm de diamètre, maintenus à 406 mm de distance les uns des autres par deux entretoises.

Un ensemble de quatre isolateurs a été installé sur le poteau numéro 1 de la ligne expérimentale (figures 1 et 3), entre deux traverses distantes de trois mètres. Il y a un isolateur Céramer, un isolateur à chape gris, un isolateur en porcelaine brun et un isolateur synthétique. Ces isolateurs ne feront pas l'objet de notre étude.

La ligne témoin, d'une portée de 31,4 m, est orientée à peu près perpendiculairement à la ligne expérimentale (figure 1), soit dans une direction parallèle aux vents dominants. Elle est constituée d'un câble témoin de 7,93 mm de diamètre (figure 4).

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

En général, les câbles sont formés de torons d'acier et d'aluminium : le câble de garde est en acier, le câble Bersimis est composé d'acier et d'aluminium.

En pratique, lorsqu'une ligne est électrifiée, le câble de garde, toujours placé sur la partie supérieure de la portée, sert à protéger les lignes à haute tension de la foudre; le câble Bersimis transporte le courant de haut voltage à 735 000 volts. Étant donné que les lignes ne sont pas électrifiées au Mont Valin, seul l'aspect mécanique des conducteurs nous intéresse.

I-3. L'INSTRUMENTATION

Les instruments présents sur le site sont les suivants (figures 1-4):

- un thermistor,
- un givromètre,
- un pluviomètre chauffant,
- un anémomètre,
- une girouette,
- quatre cellules de charge, une à l'extrémité de chaque conducteur,
- une vidéo caméra avec enregistrement.

Les signaux mesurés et enregistrés sont :

- la température de l'air mesurée par le thermistor,
- les alarmes cumulatives de givre enregistrées par le givromètre,
- les précipitations enregistrées par le pluviomètre chauffant,
- la vitesse du vent mesurée par l'anémomètre,
- la direction du vent mesurée par la girouette,
- la tension mécanique à l'extrémité du câble témoin,
- la tension mécanique à l'extrémité du câble de garde,

- la tension mécanique à l'extrémité du conducteur Bersimis,
- la tension mécanique à l'extrémité du faisceau de quatre conducteurs Bersimis.

Les signaux calculés à partir de ces mesures sont la vitesse du vent perpendiculaire à la ligne expérimentale et la masse de glace moyenne, par unité de longueur, sur chaque type de conducteur.

I-3-1. Thermistor

Le thermistor, fixé sur le poteau numéro 3, est constitué d'une sonde thermique placée sous abri, protégée du vent et des rayons solaires, avec une précision de 0,1°C.

I-3-2. Givromètre

Le givromètre, initialement appelé système de mesure de verglas ou détecteur de verglas, est un modèle GENEQ, IREQ-1000. Il est constitué d'une sonde externe reliée par des fils et une gaine à un contrôleur programmable (figure 5). Ce dernier est situé dans le bâtiment de Télé-Québec (figure 1). Ce système permet de mesurer l'accumulation de givre sur la sonde à partir de l'enregistrement d'un nombre d'alarmes. En effet, chaque fois qu'un dépôt de 0,51 mm est détecté sur la sonde, un signal d'alarme est produit sous forme de fermeture ou d'ouverture de contact de relais. Ce dépôt produit une déviation négative de 128 Hz sur la fréquence de résonance de base de 40 000 Hz. Lorsqu'une telle déviation est mesurée par le contrôleur, ce dernier émet un ordre afin de chauffer la sonde pendant dix secondes au maximum et ensuite émet un ordre de secouer mécaniquement cette même sonde pendant quatre secondes pour enlever tout dépôt d'eau causé par le chauffage de la

glace accumulée sur la sonde. Le contrôleur permet aussi de faire la distinction entre une déviation négative (correspondant à une alarme) et une déviation positive (correspondant à une inversion) de la fréquence de base. Lorsqu'une déviation positive de 110 Hz est mesurée, signifiant généralement qu'une goutte d'eau a gelé à la base de la sonde, le système émet des signaux de nettoyage à la sonde et enregistre cette action par la fermeture d'un contact de relais.

Ce système est utilisé par Hydro-Québec depuis plusieurs années (McComber et al., 1994; McComber et al., 1996). Il présente néanmoins un inconvénient : pendant le refroidissement de la sonde par convection avec l'air ambiant, le givromètre ne peut pas enregistrer d'éventuelles alarmes, mais ce temps de refroidissement dépend de la température de l'air. En effet, plus cette température est froide, plus vite la sonde va se refroidir et permettre l'accumulation d'un nouveau dépôt de givre qui produira une alarme. Si la température de l'air est moins froide, la sonde met plus de temps à se refroidir et empêche ainsi plus longtemps le givromètre d'enregistrer d'éventuelles alarmes. Le nombre d'alarmes est donc une fonction de la température de l'air ambiant. Dans notre étude, cet inconvénient a peu d'influence car nous utilisons le givromètre comme outil dans la détermination des types de glace atmosphérique présents sur les câbles de la station du Mont Valin. La précision du nombre d'alarmes compte moins que la présence d'alarmes elles-mêmes.

I-3-3. Pluviomètre

Le pluviomètre, un modèle GENEQ, P-1500, mesure la quantité de précipitations accumulées horizontalement sous la forme de verglas, de neige ou de pluie. Sur sa partie

supérieure, le pluviomètre est équipé d'une grille horizontale qui recueille les précipitations et d'un système chauffant qui fait fondre le verglas et la neige accumulés sur la grille. Les précipitations descendent ensuite sous la grille dans l'auget basculeur. Ce type de pluviomètre capte la précipitation tantôt d'un côté, tantôt de l'autre alternativement, d'un auget séparé en deux parties et placé en équilibre instable. Lors de la chute d'une quantité déterminée de précipitation de l'ordre de 25 ml, l'auget bascule, ferme un circuit électrique et met en mouvement un mécanisme qui enregistre l'intensité de cette quantité de précipitation.

I-3-4. Anémomètre

L'anémomètre est de type turbine, maintenu libre de glace grâce à un système de dégivrage formé d'une résistance électrique chauffante.

I-3-5. Girouette

La girouette est connectée à un rhéostat donnant une précision de la position angulaire d'un degré environ. Elle est équipée d'un système de chauffage.

I-3-6. Cellules de charge

Chaque conducteur est relié, à une extrémité, à une cellule de charge, appelée aussi cellule dynamométrique, elle-même attachée à un poteau. Elle mesure la tension mécanique T en livres (lbs) dans la direction du conducteur et permet de calculer la charge de glace

moyenne M en kg/m sur le câble témoin, le câble de garde, le câble Bersimis et le faisceau de quatre conducteurs.

Les cellules de charge utilisées ont différentes capacités (1000, 2000, 10 000 et 50 000 lbs). Leurs caractéristiques sont présentées dans le tableau 2 suivant.

Tableau 2 : Caractéristiques des cellules de charge

câble	capacité des cellules de charge (lbs)
câble témoin	1000 avant novembre 1987 2000 après novembre 1987 inclus
câble de garde	10 000
câble Bersimis	10 000
faisceau de quatre conducteurs	50 000

Les cellules de charge ont toutes 10 volts comme tension d'excitation et le signal de retour (en anglais, output) de chacune de ces cellules passe par un amplificateur afin d'obtenir 10 volts à la sortie du conditionneur de signal lorsque la charge maximale de la cellule de charge est atteinte. Après être sorti du conditionneur, le signal entre dans une balise Handar et à l'intérieur, il y a un diviseur de tension qui lui prend le signal et le divise en deux pour avoir 5 volts au maximum pour une échelle maximale de 1000 volts à l'intérieur de la balise.

L'amplificateur, les conditionneurs de signaux des cellules de charge et la balise Handar se trouvent à l'intérieur du bâtiment de Télé-Québec.

I-3-7. Vidéo caméra

La vidéo caméra, installée sur un pylône faisant face à la ligne expérimentale, enregistre de jour comme de nuit, une image toutes les 4 à 6 secondes sur un magnétoscope situé à l'intérieur du bâtiment de Télé-Québec.

Ceci permet d'observer la formation, le maintien et le délestage de la glace sur les câbles, l'épaisseur radiale de la glace, la répartition uniforme ou non uniforme de la glace sur des portions de câble, l'aspect granulaire ou lisse de la glace ainsi que la rotation des trois conducteurs de la ligne expérimentale sur lesquels sont fixées des tiges témoins dans la direction normale aux câbles. Un pare-glace, installé sur le pylône, protège la caméra. Nous disposons aussi d'images filmées en temps réel, lors de visites sur le site, permettant l'observation de trois phénomènes couplés sur les câbles qui sont le mouvement ascendant du câble à l'origine du galop, les vibrations en torsion et les vibrations pendulaires.

CHAPITRE II

ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES

II-1. INTRODUCTION

Pour réaliser notre analyse de la phase de maintien, nous disposons des données expérimentales de la station de givrage du Mont Valin. Mais, avant d'être en mesure d'utiliser ces données, il faut d'abord les recueillir sur le site dans le système d'acquisition, les transmettre quotidiennement au laboratoire de l'ÉRIGS, et enfin les traiter. Ces diverses étapes constituent un travail long et minutieux sur lequel reposera toute la validité des données dans notre étude.

Les données de la température de l'air, des alarmes du givromètre, des précipitations du pluviomètre, de la vitesse et de la direction du vent, et des cellules de charge des quatre conducteurs sont mesurées directement sur le site à partir d'un système d'acquisition; elles sont ensuite transmises chaque jour par modem téléphonique au laboratoire de l'ÉRIGS, à l'UQAC, puis insérées sur micro-vax, transférées sur un PC du laboratoire sur lequel elles sont finalement traitées et analysées.

II-2. SYSTÈME D'ACQUISITION

Le système automatique d'acquisition et de transmission de données est installé dans le bâtiment de Télé-Québec, à proximité des deux lignes. Son fonctionnement est schématisé sur la figure 6. Le système d'acquisition de données mesure les données statiques et les données dynamiques.

Les données statiques sont recueillies par une balise Handar, programmée de telle façon qu'un échantillon de mesures est constitué pour chaque demi-heure écoulée. Le signal provenant de chaque instrument de mesure est transmis à un conditionneur de signal avant d'être recueilli par la balise. Les données statiques sont le résultat d'une moyenne de 180 échantillons (soit toutes les 10 secondes) dans le cas des cellules de charge et de la direction du vent, de 200 échantillons (mesurés toutes les 3 secondes) dans les 10 minutes précédant l'heure d'échantillonnage dans le cas de la vitesse du vent, et d'un seul échantillon pour la température, le givromètre et le pluviomètre. Les données statiques peuvent être gardées en mémoire sur la balise seulement pendant quelques jours et sont détruites au fur et à mesure que la balise reçoit d'autres données.

Les signaux dynamiques pour les câbles et pour le vent sont enregistrés sur bande magnétique, à une fréquence de 50 échantillons par seconde, par un système numérique d'acquisition de données. Cette base de données dynamique permet de réaliser des études sur les phénomènes dynamiques des câbles tels que les vibrations, en particulier le phénomène de galop, à partir du calcul de la fréquence de résonance et des modes propres. Dans notre étude, nous analyserons uniquement les données statiques.

II-3. TRANSFERT DES DONNÉES

Le laboratoire de l'ÉRIGS communique une fois par jour avec la balise, depuis l'UQAC, à partir d'un modem téléphonique relié au PC Digital du laboratoire. La liaison téléphonique cellulaire entre la balise au mont Valin et le modem du PC du laboratoire a lieu en général vers cinq heures du matin et est rendue possible grâce à un programme informatique exécuté automatiquement sur le PC.

Les données statiques de la balise sont alors transférées sur le PC du laboratoire, enregistrées sur un répertoire du PC et sur une disquette. Les données de la balise transférées sur le PC sont sous la forme de fichiers du format .BAL pouvant contenir plusieurs journées de données; par exemple, le fichier 11705000.BAL indique que la première ligne des données est le 117^{ème} jour julien, à 05 heures, 00 minute, 00 seconde.

Tous les jours, nous vérifions si le transfert a été effectué correctement. Dans le cas contraire, nous réinitialisons le programme pour qu'il transfère ces données le lendemain; s'il y a beaucoup de données à transférer, nous appelons la balise manuellement et effectuons le transfert le jour même car la balise a une capacité de stockage restreinte et risquerait d'écraser les données non recueillies.

Plusieurs causes peuvent être à l'origine de l'échec lors de la transmission des données: une panne de courant sur le site de givrage, un problème technique sur la balise, une défaillance du réseau de transmission de la région, des interférences provenant de la tour de Télé-Québec sur le site, des conditions météorologiques et climatiques défavorables empêchant la liaison des ondes hertziennes à basse fréquence, par exemple, la présence d'un front de nuages très denses.

II-4. INSERTION DES DONNÉES SUR MICRO-VAX

À partir de la disquette de sauvegarde du PC, les fichiers du format .BAL sont mis en mémoire sur un ordinateur de type micro-vax. À l'aide du langage de programmation fortran, ils sont insérés dans la base de données non traitée qui contient les données de toutes les saisons de givrage. Ils sont aussi imprimés à des fins de vérification.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la base de données contenue dans le micro-vax n'est pas traitée. Son traitement est effectué sur un PC du laboratoire pour un mois entier de données, mais pour cela, il faut au préalable créer un fichier nommé for075.DAT sur micro-vax et contenant les données non traitées du mois qui nous intéresse.

Ce fichier est réalisé dans le répertoire BALISE\BASE du micro-vax à partir d'un programme fortran qui demande le premier et le dernier jour du mois, donnés en jour julien. Lorsque le fichier for075.DAT est créé, nous le transférons sur le PC du laboratoire à l'aide des systèmes Qvtnet ou Ws-Ftp présents sur le PC.

II-5. TRAITEMENT DES DONNÉES SUR EXCEL

Nous allons expliquer la dernière étape qui aboutit à la création de la base de données mensuelle et des graphes mensuels des données recueillies au Mont Valin, indispensables pour notre étude de la phase de maintien de la glace sur les conducteurs du site. Les données sont traitées mois par mois sur Excel, dès que nous avons obtenu un mois complet de données de la saison de givrage. En général, une saison de givrage commence en octobre et se termine au mois de mai inclus, ce qui totalise 8 mois de données.

Le fichier for075.DAT, importé du micro-vax vers le PC, est renommé du nom du mois et de l'année concernés. Pour le renommer, il faut prendre les trois premières lettres du

mois, les deux chiffres de l'année et le suffixe “.DAT ”; dans notre exemple, ce fichier est nommé avr98.DAT. À partir du fichier avr98.DAT et du fichier graphiq.XLM contenant une macro-commande d'Excel, nous allons créer sur la version 4.0 d'Excel le nouveau fichier avr98.XLW. Ce dernier fichier est un classeur contenant quinze graphes et deux fichiers qui sont les suivants:

- graphe 1: température (avril 98),
- graphe 2: givromètre (avril 98),
- graphe 3: précipitations (avril 98),
- graphe 4: vitesse du vent (avril 98),
- graphe 5: vitesse du vent (avril 98), vent perpendiculaire à la ligne,
- graphe 6: direction du vent (avril 98),
- graphe 7: masse de glace (avril 98), câble témoin ($D = 7,93$ mm),
- graphe 8: masse de glace (avril 98), câble de garde ($D = 12,5$ mm),
- graphe 9: masse de glace (avril 98), câble Bersimis ($D = 35$ mm),
- graphe 10: masse de glace (avril 98), un câble du faisceau ($D = 35$ mm),
- graphe 11: masse de glace (avril 98), faisceau de câbles ($4 * 35$ mm),
- graphe 12: masse de glace (avril 98), isolateur synthétique à âme rigide,
- graphe 13: masse de glace (avril 98), isolateur à chape gris,
- graphe 14: masse de glace (avril 98), isolateur brun,
- graphe 15: masse de glace (avril 98), isolateur ceraver.

et les deux fichiers:

- graphiq.XLM : fichier contenant la macro-commande,
- avr98.DAT : fichier contenant la base de données non traitée.

La macro-commande *graphiq.XLM* a été réalisée par Serge Gauthier sur la version 4.0 d'Excel et ne peut donc être exécutée que sur Excel 4.0. Les graphes du fichier *avr98.XLW* sont insérés dans le rapport final "Étude du givrage au Mont Valin, saison 1997-1998", avec les graphes des autres mois de la saison 1997-1998.

Deux données nécessitent un calcul contenu dans le fichier *graphiq.XLM* :

- la masse de glace sur chaque câble,
- la vitesse du vent perpendiculaire à la ligne expérimentale.

II-6. CALCUL DE LA CHARGE DE GLACE PAR UNITÉ DE LONGUEUR

La masse de glace, aussi définie par la charge de glace par unité de longueur, en kg/m, est calculée pour chaque câble à partir de la mesure de la tension mécanique à l'extrémité des câbles (McComber et al., 1987).

Le calcul est fait à partir des conditions d'équilibre et de la géométrie du câble, en supposant que la charge de glace est uniformément répartie sur le câble (Bernardin, 1989).

II-6-1. Équation de la charge de glace en fonction de la tension mécanique

Nous allons exprimer la charge de glace, en kg/m, en fonction de la tension mécanique, en Newton, de la cellule de charge placée à l'extrémité du câble. La figure 7 représente un câble soumis aux tensions mécaniques et au poids de la glace.

L'équilibre du système se traduit par le principe suivant : la somme des forces appliquées à un système en équilibre est égale au vecteur nul.

Donc

$$\sum \vec{F}_{\text{appliquées au câble}} = \vec{0}$$

$$\Leftrightarrow \sum_1^2 \vec{T}_i + \vec{P} = \vec{0} \quad (2.1)$$

Dans cet équilibre, nous négligeons les forces aérodynamiques créées par le vent sur la section transversale du câble, les forces créées par les vibrations et la torsion du câble, ainsi que les efforts de flexion. Nous conservons l'effet de la dilatation thermique qui apparaît dans la variation des angles θ_1 et θ_2 .

Soit T_1 la variation de la tension mécanique due à la glace (N), mesurée par la cellule de charge, en A

T_2 la variation de la tension mécanique due à la glace (N), en B

P le poids de glace (N)

L la longueur du câble (m)

p le poids de glace par unité de longueur (N/m), $p = P/L$

M la masse de glace (kg)

W la charge de glace par unité de longueur (kg/m), $W = M/L$

g l'accélération de pesanteur, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

l petit allongement du câble produit par la dilatation thermique (m)

θ_1 angle fait par le câble avec l'horizontale au poteau 1, en A

θ_2 angle fait par le câble avec l'horizontale au poteau 2, en B

α petit angle variable produit par la dilatation thermique en A

β petit angle variable produit par la dilatation thermique en B

Nous projetons l'équation (2.1) suivant l'axe (0x) :

$$T_1 \cos(\theta_1 + \alpha) - T_2 \cos(\theta_2 + \beta) = 0 \quad (2.2)$$

Nous exprimons T_1 en fonction de T_2 à l'aide de (2.2) :

$$T_2 = \frac{T_1 \cos(\theta_1 + \alpha)}{\cos(\theta_2 + \beta)} \quad (2.3)$$

Nous projetons l'équation (2.1) suivant l'axe (0y) :

$$T_1 \sin(\theta_1 + \alpha) + T_2 \sin(\theta_2 + \beta) - P = 0$$

donc

$$P = T_1 \sin(\theta_1 + \alpha) + T_2 \sin(\theta_2 + \beta)$$

Nous remplaçons T_2 par T_1 à partir de (2.3) :

$$P = T_1 \sin(\theta_1 + \alpha) + \frac{T_1 \cos(\theta_1 + \alpha)}{\cos(\theta_2 + \beta)} \cdot \sin(\theta_2 + \beta) \quad (2.4)$$

or $P = M \cdot g$

et

$$W = \frac{M}{(L+1)}$$

Au lieu d'utiliser le poids vertical P , en Newton, nous utilisons plutôt la notion de charge de glace moyenne W par unité de longueur, en kg/m.

donc $W = \frac{P}{g \cdot (L+1)}$

En remplaçant P par l'expression de l'équation (2.4), nous obtenons :

$$W = \frac{T_1 \sin(\theta_1 + \alpha) + \frac{T_1 \cos(\theta_1 + \alpha)}{\cos(\theta_2 + \beta)} \cdot \sin(\theta_2 + \beta)}{g \cdot (L+1)} \quad (2.5)$$

α , β et l sont les paramètres qui font intervenir l'effet de la dilatation thermique. Malheureusement, nous ne pouvons pas mesurer ces paramètres de façon précise car ils changent constamment en fonction de l'instant t . Si nous négligeons la dilatation thermique sur les câbles, alors :

$$\alpha = 0$$

$$\beta = 0$$

$$l = 0$$

et l'équation (2.5) devient :

$$W = \frac{T_1 \sin(\theta_1) + \frac{T_1 \cos(\theta_1)}{\cos(\theta_2)} \cdot \sin(\theta_2)}{g \cdot L}$$

En considérant que les angles θ_1 et θ_2 sont sensiblement égaux et donc que le câble est symétrique entre les deux poteaux, nous obtenons :

$$W = \frac{2 \cdot T_1 \sin(\theta_1)}{g \cdot L} \quad (2.6)$$

II-6-2. Équation de la tension mécanique en fonction de la cellule de charge

Nous allons exprimer la tension mécanique de la cellule de charge, en Newton, en fonction de la tension de la cellule de charge, en volts, lue sur la balise.

Soit U la tension de la cellule de charge lue sur la balise (volts)

C la capacité de la cellule de charge (lbs)

K l'échelle complète de la balise (en anglais, full scale) = 1000

$$T_i = \frac{g}{2,205} \times \frac{C}{K} \times U \quad (2.7)$$

II-6-3. Facteurs de conversion des conducteurs

Soit l'équation (2.6) :

$$W = \frac{2 \cdot T_i \sin(\theta_i)}{g \cdot L}$$

Nous remplaçons T_i par l'expression de l'équation (2.7) :

$$W = \frac{2 \cdot \sin(\theta_i)}{g \cdot L} \times \frac{g}{2,205} \times \frac{C}{K} \times U$$

donc

$$W = \frac{2 \cdot \sin(\theta_i)}{L \times 2,205} \times \frac{C}{K} \times U$$

Le facteur de conversion F d'un câble de longueur L (en m), faisant un angle θ_i avec l'horizontale au poteau 1, muni d'une cellule de charge de capacité C (en lbs) avec une échelle complète K de la balise égale à 1000 est :

$$F = \frac{2 \cdot \sin(\theta_i)}{L} \times \frac{1}{2,205} \times \frac{C}{K}$$

Ainsi, le calcul de la charge de glace par unité de longueur W (en kg/m) sur un câble s'obtient en multipliant le facteur de conversion F du câble par la tension U de la cellule de charge du câble lue sur la balise (en volts):

$$W = F \times U$$

Le facteur de conversion F est différent pour chaque conducteur. Le tableau 3 présente les caractéristiques des conducteurs utilisées dans le calcul des facteurs de conversion.

Tableau 3 : Facteurs de conversion des conducteurs

CONDUCTEUR	θ_1 (°)	L (m)	capacité C des cellules de charge (lbs)	FACTEUR DE CONVERSION DE 1985 À 1998
TÉMOIN diamètre = 7,93 mm	12,5	32,62	1000 avant novembre 1987	0,00602
			2000 après novembre 1987 inclus	0,01204
GARDE diamètre = 12,5 mm	16	97,76	10 000	0,02557
BERSIMIS diamètre = 35 mm	18	98,11	10 000	0,02857
FAISCEAU diamètre = 35 mm (4 fois)	24	99,38	50 000	0,18561 (4 câbles) 0,04640 (1 câble)

II-6-4. Facteurs de conversion des isolateurs

$$\sum \vec{F} \text{ appliquées à l'isolateur} = \vec{0} \quad (2.8)$$

Projetons l'équation (2.8) suivant l'axe (Oy) :

$$P = T_{\text{isolateur}} \quad (2.9)$$

or

$$P = M.g$$

De plus, la tension mécanique de la cellule de charge de l'isolateur, en Newton, est exprimée en fonction de la tension de la cellule de charge, en volts, lue sur la balise :

$$T_{\text{isolateur}} = \frac{g}{2,205} \times \frac{C}{K} \times U$$

En remplaçant P et $T_{\text{isolateur}}$ par leurs expressions respectives, l'équation (2.9) devient:

$$M.g = \frac{g}{2,205} \times \frac{C}{K} \times U$$

$$M = \frac{1}{2,205} \times \frac{C}{K} \times U$$

Le facteur de conversion F d'un isolateur placé sur le poteau 1, muni d'une cellule de charge de capacité C (en lbs) avec une échelle complète K de la balise égale à 1000 est :

$$F = \frac{1}{2,205} \times \frac{C}{K}$$

Ainsi, le calcul de la masse de glace M (en kg) présente sur un isolateur s'obtient en multipliant le facteur de conversion F du câble par la tension U de la cellule de charge de l'isolateur lue sur la balise (en volts):

$$M = F \times U$$

Sur le site de givrage, deux types de cellules de charge peuvent être appliqués aux isolateurs : une cellule de charge de 1000 lbs et une de 2000 lbs. Le tableau 4 présente les facteurs de conversion des isolateurs en fonction de chacune des cellules de charge utilisées.

Tableau 4 : Facteurs de conversion des isolateurs

ISOLATEURS	FACTEUR DE CONVERSION DE 1985 À 1998
1000 lbs	0,45351
2000 lbs	0,90703

II-7. VITESSE DU VENT

II-7-1. Facteur de conversion pour l'anémomètre

La valeur V_{balise} de la vitesse du vent, lue dans la balise et sur le micro-vax, est cinq fois plus grande que la vitesse réelle du vent, notée $V_{\text{réelle}}$:

$$V_{\text{réelle}} = \frac{1}{5} \times V_{\text{balise}} = 0,2 \times V_{\text{balise}}$$

II-7-2. Formulation de la vitesse du vent perpendiculaire

La figure 1 montre l'orientation de la ligne expérimentale par rapport au nord géographique, lui-même représenté par rapport au nord magnétique.

Lorsque la girouette est placée dans la direction nord, elle indique $16,8^\circ$ comme valeur dans la balise Handar, ce qui correspond à l'orientation du nord magnétique par rapport au nord géographique. Donc, par rapport à la ligne expérimentale, le nord dans la balise est à $325,2^\circ (= 360^\circ - (18^\circ + 16,8^\circ) = 360^\circ - (34,8^\circ))$. La direction du vent perpendiculaire à la ligne expérimentale est $304,8^\circ$, dans la balise ($= 360^\circ - (90^\circ - 34,8^\circ)$). La formule de la vitesse du vent perpendiculaire à la ligne expérimentale est la suivante :

$$\begin{aligned} V_p &= 0,2 \times V_{\text{balise}} \times \sin(\text{direction du vent} - (304,8^\circ - 90^\circ)) \\ &= 0,2 \times V_{\text{balise}} \times \sin(\text{direction du vent} - 214,8^\circ) \end{aligned}$$

La vitesse V_p du vent perpendiculaire à la ligne expérimentale dépend de la valeur du vent et de la direction du vent. Son calcul est contenu dans le fichier macro-commande graphiq.XLM.

Si V_p est positif, alors le vent perpendiculaire est de direction ouest; si V_p est négatif, alors le vent perpendiculaire est de direction est.

II-8. DÉCALAGES DE LA MACRO-COMMANDE

Les classeurs de format .XLW correspondant à chaque mois d'une saison de givrage, tel que mentionné dans le paragraphe II-5, doivent tenir compte du décalage des cellules de charge, différent en début et en fin de saison. Les décalages des cellules de charge des câbles sont dus au poids du câble qui s'ajoute à la mesure de la charge de glace (Portaix, 1999). Pour calculer le décalage de chaque câble et chaque isolateur, il faut considérer le signal de la masse de glace en début et en fin de la saison lorsqu'il n'y a pas eu de glace et faire une moyenne.

En effet, lorsque la saison de givrage se termine, il faut modifier le décalage jusque-là provisoire des cellules de charge des différents câbles et des isolateurs pour que les graphes contenus dans chaque classeur soient valides. Étant donné que le décalage est provisoire en début de saison, les classeurs de format .XLW contenant les données d'un mois entier le sont aussi. Quand le décalage est calculé pour chaque câble et chaque isolateur, nous devons insérer manuellement le décalage des câbles et des isolateurs dans le tableau 5 ci-dessous se trouvant sur la cellule E3 de la macro-commande du fichier graphiq.XLM et créer de nouveau les classeurs .XLW de la saison à partir du fichier graphiq.XLM (voir le paragraphe II-5). Le tableau 5 est identique pour toute la saison.

Il est souvent difficile de trouver les décalages, car pendant une saison, il peut arriver que les conditionneurs de signaux de la balise soient changés plusieurs fois.

Tableau 5 : Insertion des décalages dans la macro-commande

Paramètre	Facteur	Décalage (-)	Décalage (+)
TEMPÉRATURE	xxxxxxx	xxxxxxx	pour graph. pluviomètre
CÂBLE TÉMOIN	0,01204	0,4708	
FAISCEAU DE CÂBLES	0,18561	9,893	
ISO. PORC. BRUN	0,907	83,0839	
ISO. CHAPE GRIS	0,907	65,1248	
ISO. SYNTHÉTIQUE	0,4545	18,5939	
BERSIMIS	0,02857	2,1256	
ISO. CERAVER	0,907	58,4127	
CÂBLE DE GARDE	0,02557	0,8592	
VITESSE DU VENT	0,2	0	
DIRECTION DU VENT	xxxxxxx	xxxxxxx	66,75
ALARMES DE VERGLAS	0,01	0	
UN CÂBLE DU FAISC.	0,25	xxxxxxx	
PLUVIOMÈTRE	1	0	
VITESSE PERPEND.	xxxxxxx	214,8	

II-9. TRAVAIL EFFECTUÉ DANS LE CADRE DE NOTRE ÉTUDE

Notre analyse repose sur l'utilisation des données de 12 saisons de givrage au Mont Valin, de la saison 86-87 à la saison 97-98 incluse. Une très grande partie de notre étude a dû être consacrée au recueil des données et à leur traitement avant de pouvoir les analyser. Cette partie fait l'objet d'un travail commun réalisé avec Christophe Portaix (Portaix, 1999).

Les 5 saisons 86-87, 87-88, 88-89, 89-90, 90-91, insérées sur micro-vax, n'étaient ni transférées, ni traitées sur le PC du laboratoire en raison d'un problème de compilateur du programme fortran qui permet de créer le fichier for075.DAT. La base de données de ces 5 saisons ne pouvait donc être utilisée que sur le micro-vax et ne pouvait pas être analysée

sur PC. Ce problème provient du changement du nombre de colonnes sur les fichiers de format .BAL à partir du 1^{er} novembre 91, date à laquelle le pluviomètre a été installé au Mont Valin. Avant l'installation du pluviomètre, les fichiers .BAL présents sur le micro-vax étaient insérés sur 15 colonnes. Avec le pluviomètre, ils sont insérés sur 16 colonnes. Les fichiers .BAL sont donc passés de 15 à 16 colonnes le 1^{er} novembre 1991. Le programme fortran permettant de créer le fichier for075.DAT a tenu compte de la colonne supplémentaire mais s'est avéré inutilisable pour les fichiers de 15 colonnes, ce qui a empêché le transfert des fichiers de 15 colonnes. En plus de ces 5 saisons, la saison 91-92, saison pendant laquelle le pluviomètre a été installé, n'a pas été transférée et traitée sur le PC pour des raisons d'incompatibilités informatiques. Un assistant de recherche informaticien, Louis-Michel Gagnier, a réglé ce problème de compilation. Ainsi, nous avons pu transférer mois après mois le fichier for075.DAT pour chaque mois de données des 6 saisons citées précédemment (de 86-87 à 91-92) et réaliser les classeurs .XLW de chaque mois de toutes les saisons en tenant compte des décalages des cellules de charge et des facteurs de conversion des câbles et des isolateurs, différents pour chaque saison. De plus, nous avons effectué le transfert quotidien des données de la saison 97-98, leur insertion sur micro-vax, leur transfert sur PC, et leur traitement en classeur .XLW sur Excel. Les saisons 92-93, 93-94, 94-95, 95-96 et 96-97 ont été transférées et traitées au fur et à mesure des saisons par Marco Boudreault, un assistant de recherche de l'ÉRIGIS. Le tableau 6 résume clairement le paragraphe que nous venons d'énoncer.

Tableau 6 : Récapitulatif des saisons

saison	pluviomètre installé pendant cette saison	nombre de colonnes sur les fichiers .BAL du micro-vax	transfert réalisé du micro-vax vers le PC et classeurs .XLW créés sur PC avant août 1998
86-87	non	15	non
87-88	non	15	non
88-89	non	15	non
89-90	non	15	non
90-91	non	15	non
91-92	oui	16	non
92-93	oui	16	oui
93-94	oui	16	oui
94-95	oui	16	oui
95-96	oui	16	oui
96-97	oui	16	oui
97-98	oui	16	oui

De plus, avec Louis-Michel Gagnier, nous avons participé à l'amélioration de la macro-commande graphiq.XLM sur Excel. Désormais, lorsque la macro-commande traite un fichier .DAT, elle détecte les données manquantes du fichier .DAT et continue son traitement; avant, elle s'arrêtait et il fallait relancer la macro. De plus, la macro a été améliorée au niveau du comptage cumulatif des précipitations du pluviomètre.

Il est à noter que le séparateur des données sur le micro-vax et sur les fichiers .DAT n'est plus les guillemets (") mais le point virgule (;) en raison de l'ajout de la nouvelle colonne du pluviomètre sur le compilateur du micro-vax car sinon les formats étaient dépassés.

CHAPITRE III

LE MAINTIEN DE LA GLACE SUR UN CÂBLE

Jusqu'à présent, de nombreuses études expérimentales, fondamentales et numériques ont été réalisées sur l'accrétion et le délestage de la glace atmosphérique sur un câble afin de mieux comprendre ces deux phénomènes. Mais, très peu d'ouvrages traitent de ce qui n'évolue pas sur le câble, en l'occurrence, le maintien de la glace sur le câble. Dans cette partie, nous présentons l'évolution d'un événement de givrage atmosphérique sur un câble, décomposable suivant trois phases qui sont l'accrétion, le maintien et le délestage. Puis, nous définissons le concept de phase de maintien. Par la suite, nous expliquons l'envergure de notre étude qui va porter sur la durée de la phase de maintien et sur la charge maximale atteinte pendant la phase de maintien. Enfin, nous présentons le phénomène d'accrétion et les types de délestage existants.

III-1. DÉCOMPOSITION D'UN ÉVÉNEMENT DE GLACE ATMOSPHÉRIQUE

Par convention, une saison de givrage commence dès qu'il y a de la glace sur un ou plusieurs câbles et se termine quand il n'y a plus de glace sur les câbles. Chaque saison de givrage se décompose en événements de glace atmosphérique, un événement pouvant comprendre trois phases successives:

- une phase d'accrétion de la glace,
- une phase de maintien de la glace,
- une phase de délestage de la glace.

Les figures 8 à 12 présentent des événements comprenant les trois phases successives. Nous distinguons la phase d'accrétion se terminant au point A, la phase de maintien se situant entre les points A et B, et la phase de délestage débutant au point B. Sur la figure 8, la phase de maintien commence le 11/10/93 à 8 :00 et se termine le 14/10/93 à 6 :30 pour le premier événement, et elle commence le 22/10/93 à 11 :00 et se termine le 27/10/93 à 11 :00 pour le deuxième événement. Sur la figure 9, la phase de maintien commence le 21/10/97 à 12 :30 et se termine le 30/10/97 à 17 :30. Sur la figure 10, la phase de maintien commence le 4/1/93 à 23 :00 et se termine le 21/1/93 à 17 :30. Sur la figure 11, la phase de maintien commence le 25/4/95 à 7 :30 et se termine le 26/4/95 à 6 :00. Sur la figure 12, la phase de maintien commence le 19/1/98 à 18 :00 et se termine le 23/1/98 à 4 :00.

Il peut arriver qu'il n'y ait pas de phase de maintien. Cela est très fréquent en présence d'événements de verglas, au début et en fin de saison. En effet, un événement de verglas de ce type est caractérisé par une phase d'accrétion suivie immédiatement d'une phase de délestage provoquée par une fonte rapide de la glace (figures 13-15).

Parfois, un événement de glace atmosphérique n'a pas de phase de délestage (figures 16-18) : la phase d'accrétion se termine au point A, la phase de maintien se situe entre les points A et C, le point C définissant la fin de l'événement. Nous expliquerons ce cas particulier d'événement plus tard. Sur la figure 16, la phase de maintien commence le 19/12/95 à 8 :00 et se termine le 20/12/95 à 21 :00. Sur la figure 17, la phase de maintien commence le 13/2/98 à 5 :30 et se termine le 16/2/98 à 5 :30. Sur la figure 18, la phase de maintien commence le 12/3/98 à 6 :00 et se termine le 15/3/98 à 15 :00.

III-2. DÉFINITION DE LA PHASE DE MAINTIEN

La phase de maintien est la phase se situant entre la phase d'accrétion et la phase de délestage. En général, la phase de maintien de la glace est la plus longue des trois phases, elle peut durer de quelques heures à quelques mois. Cette phase caractérise l'état de stabilité de la glace qui se maintient de façon aléatoire sur les câbles.

Contrairement à la phase d'accrétion et à la phase de délestage, la phase de maintien n'est pas toujours identique à elle-même. Cette phase correspond à la période où la glace se maintient sur le câble sous diverses formes qui dépendent du type de glace formé pendant cette phase et des conditions atmosphériques. Au cours de la phase de maintien, le câble subit un grand nombre d'accrétions partielles et de délestages partiels, parfois même d'importants délestages sans pour autant que la phase ne se termine. Les câbles sont donc soumis à de fortes variations de la charge de glace pendant de longs jours. De plus, la glace en maintien, cumulée aux effets aérodynamiques produits par le vent perpendiculaire sur le câble, peut être à l'origine de la rotation du câble et de vibrations sur le câble.

La phase de maintien est tout ce qui n'est pas de l'accrétion à l'état pur et du délestage à l'état pur. Le maintien commence donc lorsque la phase d'accrétion se termine et il cesse au début du délestage final. Cette vision de la phase de maintien est très simpliste et très générale car le maintien de la glace fait partie d'un concept nouveau qu'il faut définir clairement. Le premier travail va consister à définir des critères d'identification appropriés à cette phase qui ne doit pas empiéter sur les phases d'accrétion et de délestage. La difficulté sera de trouver des critères applicables à tous les événements.

Précisons que la phase de maintien est différente de la définition de la phase d'endurance correspondant à une croissance ou décroissance lente du dépôt de glace ou encore à un palier (Druez, 1988; Csomor and Rezsofi, 1988; Bernardin, 1989).

Mais la phase de maintien peut comporter des périodes d'endurance correspondant à une croissance ou décroissance lente du dépôt de glace, ou à un palier.

III-3. PROBLÉMATIQUE DU MAINTIEN

Le maintien des dépôts de glace sur des câbles et sur des conducteurs est un paramètre qui a été négligé, dans le passé, en faveur de l'accumulation de la glace ou du délestage de la glace (Laflamme, 1998). En effet, le maintien n'a jamais fait l'objet d'une étude complète et précise. Pourtant, ce concept mérite plus d'attention car c'est souvent pendant la phase de maintien qu'apparaissent les charges extrêmes de glace sur les câbles, ainsi que les délestages pouvant être à l'origine des charges de déséquilibre sur une ligne comportant plusieurs câbles.

Plus la glace se maintient longtemps, plus les charges de glace seront susceptibles d'augmenter sur le câble, ce qui peut avoir des conséquences désastreuses. En effet, du 5 au 9 janvier 1998, la région de Montréal a connu plusieurs épisodes de pluie verglaçante qui ont provoqué, en certains endroits, des accumulations de verglas de près de 100 mm (Hydro-Québec-IREQ, 1998). Cette tempête a entraîné la rupture mécanique de nombreux câbles de transport d'électricité et même de lignes, ce qui a paralysé toute une région en la privant d'électricité.

Dans le cas des câbles, le délestage est responsable d'une grande partie des accidents liés à la glace (Bernardin, 1989; Druez, Louchez, McComber, 1991). Pendant la phase de maintien, le câble subit de nombreux délestages qui peuvent être à l'origine de charges inégales entre les câbles d'une même ligne, ce qui crée un déséquilibre au niveau de la répartition de la charge de glace sur la ligne. Par ailleurs, un délestage important et rapide

pendant la phase de maintien peut induire le saut du câble et créer un court-circuit si le câble en mouvement entre en contact avec un autre câble.

Le vent est un paramètre important qu'il faut considérer pendant le maintien de la glace. Le vent, combiné aux charges de glace, est à l'origine de phénomènes vibratoires sur le câble tels que le galop, ce qui fatigue mécaniquement le câble et réduit donc sa durée de vie. En effet, le galop est une oscillation de très forte amplitude résultant de l'action du vent sur les câbles lorsque ceux-ci deviennent aérodynamiquement instables à cause de la glace qui les recouvre. Plus la période du maintien est longue, plus la probabilité d'avoir des amplitudes de vent élevées est grande (Elfashny et al., 1996). Ces vents élevés, mis en présence d'une très faible quantité de glace sur le câble, peuvent créer le galop. Ce qui signifie que même avec très peu de glace, de longues durées de maintien peuvent augmenter le risque de galop du conducteur lorsque les vents perpendiculaires sont élevés (Laflamme, 1998).

III-4. LA DURÉE DE LA PHASE DE MAINTIEN

Les réseaux de transmissions électriques et de télécommunications des pays froids sont soumis à des conditions météorologiques extrêmes caractérisées par des tempêtes de givre ou de verglas. En janvier 1998, la région de Montréal a été paralysée par une tempête de verglas d'une durée exceptionnelle. Ceci démontre le besoin urgent d'étudier la phase de maintien de la glace atmosphérique sur les câbles de façon plus détaillée. La durée de la phase de maintien de la glace est liée à des facteurs naturels tels que la température de l'air, l'effet du vent sur les câbles, les différents types de glace, seuls ou mélangés, qui se forment sur les câbles. Notre étude va permettre de déterminer quels facteurs influencent la durée de la phase de maintien parmi les suivants:

- la température moyenne de l'air pendant la phase de maintien,
- le type de glace ou le mélange présent sur le câble pendant la phase de maintien,
- le vent perpendiculaire moyen au carré pendant la phase de maintien, traduisant les effets aérodynamiques du vent sur le câble,
- la distribution de la charge de glace pendant le maintien (écart-type, moyenne, coefficient de variation, médiane)
- la charge maximale pendant la phase de maintien,
- la charge maximale en fin de phase d'accrétion,
- la durée de la phase d'accrétion,
- la charge minimale pendant la phase de maintien,
- les délestages partiels de grande amplitude pendant la phase de maintien,
- le vent perpendiculaire maximal pendant la phase de maintien.

III-5. LA CHARGE MAXIMALE PENDANT LA PHASE DE MAINTIEN

Dans les régions nordiques, il est primordial de connaître les valeurs maximales de charge de glace sur les câbles afin d'établir les normes nécessaires à la conception et à la fiabilité des câbles des lignes de transport électrique. Nous nous sommes donc intéressés à l'étude de la charge maximale des événements de glace atmosphérique des douze saisons de givrage à la station de recherche du Mont Valin. Cette charge maximale apparaît le plus souvent pendant la phase de maintien, mais elle peut aussi apparaître en fin de phase d'accrétion qui coïncide avec le début de la phase de maintien. Nous disposons d'un nombre important d'événements, ce qui nous permet de réaliser une analyse statistique qui sera significative en raison de la taille de l'échantillonnage. Nous allons réaliser une analyse de régression sur la charge maximale des événements de glace atmosphérique

pendant la phase de maintien afin d'identifier le rôle des paramètres liés à la charge maximale : le type de glace ou de mélange correspondant à cette charge maximale, la durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte, la charge de glace en fin de phase d'accrétion, et le taux d'accrétion moyen pendant la phase d'accrétion.

De plus, il est intéressant de regarder à quel type de glace ou de mélange correspondent les plus importantes valeurs de charge maximale, et vice versa, à quelle valeur maximale de charge de glace nous pouvons nous attendre pour la glace de type verglas, de type givre, de type neige mouillée et pour les mélanges.

L'objectif de cette étude sur la charge maximale est d'être en mesure de prévoir la charge maximale d'un événement de glace atmosphérique à partir d'autres paramètres, ce qui sera réalisé sous la forme d'un tableau récapitulatif.

Précisons que seules les charges maximales des événements de glace comprenant une phase de maintien seront considérées dans notre étude. Les cas non considérés font partie de l'étude du mémoire de Christophe Portaix (Portaix, 1999).

III-6. ACCRÉTION DE LA GLACE SUR LES CÂBLES

Plusieurs études ont été réalisées afin de comprendre le phénomène physique de l'accrétion de la glace sur des câbles. L'objectif de ces études est de créer le modèle d'accrétion le plus proche de la réalité. Un modèle très simple est le modèle du taux d'accrétion constant (Chaîné and Castonguay, 1974) :

$$\frac{dM}{dt} = K = I.D_0 \quad (3.1)$$

$$M(t) = M_0 + K.t \quad (3.2)$$

avec M la charge de glace par unité de longueur (kg/m)

I l'intensité de givrage ou débit d'eau captée (kg/m².h)

D_0 le diamètre initial équivalent (m)

K une constante

M_0 la charge initiale de glace par unité de longueur (kg/m)

Un autre modèle prédit que le taux d'accrétion augmente suivant une loi exponentielle:

$$M(t) = M_0 \cdot \exp(Kt) \quad (3.3)$$

Ces deux modèles d'accrétion de la glace sur un câble sont utilisés dans la validation de modèles numériques (Makkonen, 1984), dans les études réalisées en milieu naturel (Druez et al., 1988; Druez and McComber, 1996) ou en laboratoire, et dans l'interprétation de l'analyse statistique du taux d'accrétion (Portaix, 1999).

III-7. TYPES DE DÉLESTAGE

Par définition, un délestage est une réduction de la charge de glace. Les délestages de la glace présente sur les câbles de la station de recherche du Mont Valin sont classés en trois catégories (Bernardin, 1989; Druez et al., 1990; Druez et al., 1995) :

- le délestage par fonte,
- le délestage par bris mécanique,
- le délestage par sublimation.

Le délestage par fonte peut causer soit la fusion de la glace, soit son décollement.

III-7-1. Délestage par fonte

Le délestage par fonte se produit lorsque la température de l'air ambiant devient supérieure à 0°C. Dans ce cas, la décroissance de la charge de glace est faible, de l'ordre de la sublimation, ou élevée, de l'ordre du délestage mécanique (Bernardin, 1989).

III-7-2. Délestage par bris mécanique

Le délestage par bris mécanique se produit à des températures négatives et se caractérise par une forte décroissance de la charge de glace. Ce phénomène est lié à une rupture de la glace causée par un dépassement des limites rhéologiques du matériau (Bernardin, 1989). Cette rupture peut être provoquée par des charges statiques (flexion ou torsion du câble), des charges dynamiques (vibrations, mouvement pendulaire, galop) ou par la vitesse du vent, suivant le type de glace déposé sur le câble, la température de l'air, la température de dépôt de la glace. Le délestage par bris mécanique, à la différence du délestage par fonte, résulte de plusieurs effets et de leurs combinaisons, mais parfois, ces effets n'agissent pas au moment du délestage pour provoquer ce type de délestage. Ils peuvent agir chacun indépendamment, pendant une certaine période avant le délestage, et un de ces effets finit par provoquer le délestage par bris mécanique. Il est donc très difficile d'expliquer la cause de ce délestage car il a une histoire.

Le bris mécanique provoque des réductions de la charge de glace pouvant atteindre, sur une période d'une heure, jusqu'à 100 % de la masse totale du dépôt (Bernardin, 1989).

III-7-3. Délestage par sublimation

La sublimation, pour un corps donné, correspond au passage direct de la phase solide à la phase gazeuse; dans notre cas, de la glace à la vapeur d'eau. La sublimation réduit la quantité de glace sur les câbles. Elle se produit au niveau de l'interface glace-air et est donc plus importante lorsque la surface du dépôt est plus grande (Bernardin, 1989).

Un délestage par sublimation est caractérisé par une faible décroissance de la charge de glace se produisant à des températures négatives (Bernardin, 1989). Selon les conditions des expériences de Lambrinos et al. (1987), la quantité de glace sublimée en dix heures peut varier de 3 à 40 % de la masse totale (Bernardin, 1989).

Bernardin (1989) a effectué des lissages pour des périodes de sublimation. Ces lissages ont montré que le taux de décroissance est essentiellement constant durant ces périodes. En accord avec le modèle de Lambrinos et al. (1987), elle a montré que le taux de décroissance augmente avec la charge de glace initiale et diminue avec la température.

III-7-4. Délestage mécanique amorcé par fonte

Il existe un dernier type de délestage : le délestage mécanique amorcé par fonte. Ce délestage s'explique par une perte de cohésion interne de la glace et/ou une perte d'adhésion entre la glace et le câble résultant du réchauffement de la température de l'air ambiant dépassant 0°C, sans qu'il y ait une fonte totale de la glace. En général, la température reste positive et il y a décollement de la glace.

III-8. SITES EN MILIEU NATUREL

Les études en milieu naturel sont très intéressantes car elles permettent l'observation en temps réel des phénomènes liés au dépôt de la glace sur les câbles. De nombreux sites en milieu naturel, comportant des lignes expérimentales avec des câbles, existent un peu partout dans le monde. Nous pouvons citer par exemple :

- Le site du Mont Valin, créé en 1984, au nord de Chicoutimi, au Canada, étudie principalement le givrage des structures (Druez et al., 1988; Druez et al., 1991; Druez and McComber, 1997).
- Le site du Mont Bélair, créé en 1994 par Hydro-Québec, près de la ville de Québec, au Canada, est composé de deux lignes à haute tension de 735 et 315 kV. L'objectif de ce site est l'étude du verglas. (Hardy et al., 1996; Laflamme et al., 1996).
- Le site du Mont Ibuki, au Japon, est un site en milieu montagneux où les nuages givrants sont fréquents, ce qui permet d'étudier le phénomène du givrage (Kawamura et al., 1990).
- Le site du Mont Washington, au New Hampshire, aux États-Unis, créé en 1978 par le CRREL, a pour objectif d'étudier la glace atmosphérique sur les conducteurs (Govoni and Ackley, 1981; Govoni and Ackley, 1984).
- Le site près de Petersburg, en Alaska, aux États-Unis, créé en 1984, vise l'étude de la pluie verglaçante et de la neige (Peabody, 1996).

CHAPITRE IV

INTRODUCTION À LA GLACE ATMOSPHERIQUE

Au cours des vingt dernières années, les problèmes liés à la présence de la glace dans des régions froides ont été à l'origine de l'augmentation massive de la recherche sur le sujet de l'ingénierie de la glace. La littérature qui s'y rapporte est abondante et variée. Dans ce chapitre, nous allons présenter les principaux types de glace atmosphérique, ainsi que leur contexte de formation.

IV-1. GÉNÉRALITÉS

Le physicien appelle glace toute variété d'eau à l'état solide. La glace, quels que soient son origine et son aspect physique (particules de glace de nuage, givre, verglas, grêle, glace de glacier ou de lac, neige artificielle ou d'origine naturelle, gelée), a toujours la même structure cristalline, c'est à dire que ses atomes d'oxygène et d'hydrogène ont toujours la même disposition (Lliboutry, 1964; Laforte, 1998). La masse volumique théorique de la glace à 0°C est égale à 0,917 g/cm³.

D'un point de vue purement théorique, il existe deux catégories de glace:

- la glace ordinaire, classée en quatre grandes catégories que l'on distingue en terme de l'orientation cristalline, des types de cristaux, de leur dimension moyenne et de leur porosité,
- la glace atmosphérique.

Le terme de glace atmosphérique englobe les produits de congélation de l'eau contenue dans l'atmosphère sous forme de gouttelettes d'eau surfondues contenues dans les nuages. D'autre part, ce terme peut servir également pour désigner la glace formée à partir de la vapeur d'eau condensée ou gelée qui se dépose sur des surfaces exposées en bas du point de congélation.

Dans le cas de la glace atmosphérique, le type de glace formée dépend principalement du contexte particulier de formation que nous décrivons à partir de quatre paramètres météorologiques : la température de l'air, la vitesse du vent, la grosseur des gouttelettes et la teneur en eau liquide dans l'atmosphère (Kuroiwa, 1965). Ces paramètres contrôlent la densité de la glace ou sa porosité. Les paramètres les plus importants sont la température de l'air et la vitesse du vent. La figure 19 présente la relation entre les types de glace formés et les conditions météorologiques de formation. Ce graphe résulte des travaux de Kuroiwa. Par ailleurs, des études ont montré que la taille moyenne des cristaux dans la glace atmosphérique dépend principalement de la température ambiante et à un degré moindre de la température de dépôt.

IV-2. CLASSIFICATION DES TYPES DE GLACE ATMOSPHERIQUE

Nous distinguons habituellement trois grands types de glace d'origine atmosphérique susceptibles d'entraîner des surcharges importantes sur les lignes aériennes par dépôt de glace et formation éventuelle de manchons autour des conducteurs : le verglas, le givre lourd (ou givre dur) et le givre léger (ou givre mou). Cette classification se base essentiellement sur la transparence et la densité de la glace obtenue (Laforte, 1998).

Nous allons présenter quelques caractéristiques du verglas et du givre. Le verglas se forme à partir de précipitations de pluie verglaçante ou de bruine verglaçante. Le givre est produit par des nuages givrants.

Le verglas est un dépôt de glace, généralement homogène et transparent, de surface lisse, provenant de la congélation de gouttelettes de bruine ou de gouttes de pluie, en surfusion, sur les objets dont la surface est à une température inférieure à 0°C ou très peu supérieure. Le verglas présente une masse volumique comprise entre 0,8 et 0,9 g/cm³ par référence à la masse volumique théorique de la glace qui est de 0,917 g/cm³. Le diamètre des gouttelettes de bruine verglaçante est compris entre 0,2 et 0,5 mm, celui des gouttes de pluie verglaçante est compris entre 0,5 et 6 mm. Les gouttelettes de bruine ou de pluie verglaçante sont à une température comprise entre 0 et -3°C. Lors de la formation du verglas, la teneur en eau liquide dans l'atmosphère est comprise entre 0,2 et 0,5 g/m³. Le verglas se forme principalement en régime de croissance humide.

Le givre est un dépôt granuleux de glace blanche et opaque, constitué par des granules plus ou moins séparés par des inclusions d'air. Le dépôt de givre est plus épais que la couche de glace formée lors du frimas ou de la gelée blanche, mais plus léger que le verglas. Lors de la formation du givre, la teneur en eau liquide dans l'atmosphère est inférieure à 0,5 g/m³. Nous distinguons deux catégories de givre : le givre lourd et le givre léger.

Le givre lourd est moins transparent que le verglas et quelquefois opaque, dépendamment de la quantité d'air contenue dans la glace. Sa surface est lisse ou écaillée. Sa masse volumique varie de 0,6 à 0,9 g/cm³. Sa structure rappelle celle de la neige ou celle de la glace. Le givre lourd se forme en présence de gouttelettes de brouillard mouillé en

surfusion, de diamètre compris entre 5 et 20 μm . Ces gouttelettes sont à une température comprise entre -3 et -15°C.

Le givre léger est une glace blanche et opaque composée de cristaux de glace, présentant par parties la structure de la gelée blanche. Le givre léger est d'apparence granulaire ou en aiguille avec une masse volumique plus faible que 0,6 g/cm³. Le givre léger se forme généralement par temps de brouillard ou de brume en surfusion, principalement sur les surfaces verticales, et notamment sur les coins et les arêtes des objets. Le diamètre des gouttelettes de brouillard ou de brume est compris entre 5 et 20 μm , comme dans le cas du givre lourd. Les gouttelettes favorisant la formation de givre léger sont à une température comprise entre -5 et -25°C.

IV-3. LA NEIGE

IV-3-1. Dépôts de glace et de neige au Mont Valin

Sur le site du Mont Valin, les câbles sont principalement recouverts de dépôts de givre et de verglas, parfois de neige mouillée. La glace et la neige semblent similaires en apparence, pourtant les conditions météorologiques propres à leur processus de formation sont très différentes (Kuroiwa, 1965). Il est donc important de bien différencier la neige de la glace sur les câbles de la station du Mont Valin.

IV-3-2. Terminologie

Plusieurs courants de pensée scientifique étudient la neige dans le monde. Il n'est pas possible de faire une synthèse globale et générale sur ces travaux car chaque groupe de

recherche étudie une neige spécifique, propre à un pays ou à des reliefs. Les chercheurs reprennent bien souvent les mêmes termes concernant la neige : neige collante (Admirat and Sakamoto, 1988), neige mouillée (Colbeck and Ackley, 1982), neige sèche (Shoda, 1953). En étudiant ces termes plus en profondeur, il apparaît qu'un même terme n'a pas la même signification pour chaque groupe de recherche. Loin d'être en contradiction, ces chercheurs travaillent au mieux en définissant des neiges propres à des zones géographiques ou à des phénomènes météorologiques.

IV-3-3. Définition

Pour les météorologistes, la neige est une précipitation de cristaux de glace isolés ou soudés, le plus souvent agglomérés en flocons. Il s'agit en fait d'un mélange de deux ou trois phases (glace, air saturé en vapeur d'eau et éventuellement eau liquide) entre lesquelles les échanges thermiques sont importants en raison du métamorphisme. Il existe donc plusieurs variétés de neige aux propriétés différentes suivant la teneur en eau liquide, la taille et la forme des cristaux.

IV-3-4. La neige collante

La neige collante a la propriété d'adhérer fortement aux objets qu'elle rencontre. L'accrétion de neige collante est possible chaque fois qu'une chute de neige se produit dans une masse d'air à température positive (Gland, 1984). Le facteur essentiel pour la formation de neige collante est l'intensité de la précipitation (Électricité de France, 1977; Deneau and Guillot, 1984; Gland and Admirat, 1986).

IV-3-5. Théorie de la neige sèche et de la neige mouillée

Dans ses recherches, Kuroiwa (1965) fait presque toujours référence aux études et aux résultats japonais, notamment au travail de Shoda, en 1953, qui définit deux sortes de neige (figure 20):

- la neige sèche à température négative comprise entre -3 et 0°C,
- la neige mouillée à température positive comprise entre 0 et 2°C.

Dans les travaux de Skelton and Poots (1991), deux types d'accumulation de neige ont été observés:

- l'accrétion sèche ("dry accretion", en anglais),
- l'accrétion mouillée ("wet accretion", en anglais) ou "neige collante" ("clinging snow", en anglais).

Skelton and Poots (1991) distinguent les deux types de neige à l'aide de la température de l'air. La neige sèche se produit à température négative, possède une densité faible et est cassante, fragile, tombant facilement de la surface du conducteur sous l'effet du vent. La neige mouillée est produite à température positive, entre 0 et 3°C; elle a une densité élevée, est malléable et non cassante. Elle est composée d'un mélange de glace, d'eau et d'air.

IV-3-6. Conclusion

Nous concluons qu'il existe deux sortes de neige :

- la neige sèche se formant à température négative,
- la neige mouillée se formant à température positive.

La première neige est moins dangereuse que l'autre car elle est plus friable et cassante. La neige mouillée adhère plus sur les câbles que la neige sèche. Dans notre étude, nous ne considérons que la neige mouillée.

IV-3-7. Masse volumique de la neige

La densité des flocons de neige en chute est faible. Mais, dès que la chute de la neige cesse, la densité de la neige commence à se modifier sous l'effet de nombreux facteurs tels que la pression et la température de l'air (Skelton and Poots, 1991; Poots, 1995). La masse volumique de la neige mouillée varie de 0,3 à 0,6 g/cm³ (Støttrup-Andersen, 1996).

IV-4. FORMATION DE LA GLACE ATMOSPHERIQUE

IV-4-1. Les nuages dans l'atmosphère

Les nuages sont constitués de très petites gouttelettes d'eau et parfois de cristaux de glace. Ces derniers sont à l'origine de la formation de la glace atmosphérique (Villeneuve, 1974).

IV-4-1-1. Formation des nuages

Dans l'atmosphère, la vapeur d'eau se condense par détente et forme un nuage de type cumulus ou du brouillard lorsqu'elle est mise en présence de minuscules impuretés appelées noyaux de condensation. Ces noyaux sont toujours présents dans l'atmosphère sous la forme, par exemple, de cristaux de sel marin, de pollens, de produits polluants. Ils peuvent être constitués par une particule soluble ou mouillable. Les ions salins

hygroscopiques contenus dans les océans constituent une importante source de noyaux de condensation solubles. Les particules mouillables sont rarement présentes dans l'atmosphère. Nous distinguons quatre types de noyaux de condensation, classés par ordre de grandeur (Laforte, 1998) :

- les petits ions de grosseur équivalente à environ 10 molécules, ayant une charge électrique élémentaire, formés sous l'action des radiations cosmiques et ultraviolettes. Ils n'ont aucun rôle dans la condensation en milieu naturel.
- les ions moyens. Ils sont mesurés dans le compteur d'Aitken sous la forme de noyaux d'Aitken de diamètre compris entre 0,01 à 0,06 μm . Ils sont présents en faible proportion à proximité de l'océan, plus nombreux à la campagne sous la forme de pollen, et très nombreux à la ville, dans l'air ambiant pollué par les fumées de combustion provenant des usines, des voitures ou d'autres sources.
- les gros ions, par exemple, des noyaux salins de chlorure de sodium, d'environ 0,2 μm de diamètre. Ces noyaux salins ont une teneur dans l'air de l'ordre de 130 noyaux par cm^3 . Ils sont à l'origine des gouttelettes, de rayon compris entre 1,5 et 10 μm , formant un nuage ou un brouillard.
- les noyaux géants de rayon supérieur à 1 μm . Étant très rares, leur rôle dans la formation des nuages est négligeable. Mais, nous verrons dans ce qui suit qu'ils interviennent au niveau de la formation des cristaux de glace et dans la genèse des précipitations.

Présentons un exemple concret de formation de nuage à partir de noyaux salins. Les vagues des océans, en se brisant, produisent de petites gouttelettes qui s'évaporent plus ou moins et envahissent les continents. Elles forment une brume blanche qui se voit en contre-jour sur le rivage. Les noyaux salins sont entraînés dans les courants ascendants qui

naissent au-dessus des surfaces les plus chaudes du sol. Après une ascension de un à deux kilomètres, l'air refroidi par détente arrive à saturation et de la vapeur se condense. C'est ainsi que se forment les cumulus, nuages d'ascendance reconnaissables à leur base horizontale (Dessens and Dessens, 1976; Laforge, 1998).

IV-4-1-2. Structure des nuages

À la faveur d'une forte surchauffe du sol, les cumulus se développent en cumulus congestus, et leurs sommets atteignent des régions où la température devient inférieure à 0°C sans que l'aspect des nuages en soit modifié. Cependant, l'observation de la partie supérieure des grands cumulus révèle parfois un changement de structure : le nuage contient de nombreux cristaux de glace dans cette région. Le cumulus congestus se transforme graduellement en cumulonimbus, autrement dit en orage. Ce nuage caractéristique, en forme d'enclume, ne contient plus que de la glace sur sa partie supérieure.

IV-4-2. Germination des cristaux de glace

Des observations ont montré que les gouttelettes d'eau surfondues peuvent rester liquides jusqu'à -40°C (Zarling, 1980). Si nous refroidissons un liquide et que nous mesurons la température à laquelle la cristallisation se produit spontanément, nous trouvons que la température du début de la solidification est toujours inférieure au point de fusion du liquide. Nous parlons alors de liquide surfondu et du degré de surfusion mesuré par l'écart observé entre les deux températures.

Un certain degré de surfusion est nécessaire pour qu'apparaisse le premier cristal de glace. Mais le degré de surfusion seul n'est pas une condition suffisante pour que le système commence à se solidifier. Avant que les premiers cristaux ne germent, il doit exister dans la solution un nombre de centres de cristallisation ou germes. La germination peut se produire soit spontanément ou être provoquée artificiellement par un agent extérieur. En général, nous distinguons les modes de germination suivants (Laforte, 1998):

- la germination primaire qui regroupe trois types de germination : la germination homogène ou spontanée, la germination hétérogène et la germination superficielle;
- la germination secondaire.

La germination primaire se produit sans cristal mère à la différence de la germination secondaire. Nous considérons généralement que la glace peut cristalliser soit par germination primaire hétérogène ou par germination secondaire, les autres cas de germination étant peu probables.

La germination primaire hétérogène consiste en la cristallisation de l'eau liquide à partir d'agents nucléogènes présents en très grand nombre dans la nature. C'est le mécanisme le plus important dans la nature. Il est impliqué à la fois dans la formation des cristaux de glace dans les nuages et dans le gel d'eau surfondue. Dans les deux cas, la présence de particules étrangères diminue le degré de surfusion nécessaire à la cristallisation par rapport à celui requis pour la germination homogène ou spontanée qui est de -40°C .

La germination secondaire se produit sans surfusion, seulement à partir d'un cristal mère. En effet, la meilleure des techniques pour provoquer la cristallisation d'un liquide est d'inoculer une solution surfondue avec des cristaux de la même substance. Dans ce type de germination, nous n'avons pas besoin de surfusion car les cristaux croissent à partir de germes inoculés. Dans la nature, ce mécanisme est prépondérant avec les nuages de glace

formés au-dessus de grandes étendues d'eau et quand de la neige ou de la glace tombe dans l'eau.

IV-4-3. Formation des cristaux de glace atmosphérique

Dans les nuages, le cristal de glace atmosphérique ne se forme pas directement à partir de la vapeur, mais par congélation de gouttelettes d'eau surfondues mises en présence d'un noyau glaçogène (figure 21). Cette congélation nécessite l'action d'agents extérieurs ayant une activité glaçogène. Ce rôle est joué, dans les nuages naturels, par des noyaux géants qui ont en moyenne 10 μm de diamètre. Il existe aussi des substances artificielles qui peuvent provoquer l'apparition des cristaux de glace. Par exemple, l'iodure d'argent agit dès -5°C et l'iodure de plomb, le sulfure de cuivre et l'oxyde de tungstène sont efficaces à -6°C .

IV-4-4. Genèse des précipitations

Nous distinguons deux mécanismes de formation de la pluie : le mécanisme de Langmuir et le mécanisme de Bergeron (Laforte, 1998).

IV-4-4-1. Mécanisme de Langmuir

Dans les cumulus congestus, se trouvent des noyaux géants sous la forme de gouttelettes de plus de 20 μm de rayon. Ces grosses gouttelettes s'accroissent en captant des gouttelettes ordinaires, et deviennent des gouttes de pluie, trop lourdes pour pouvoir être soutenues par les courants ascendants. C'est le mécanisme de Langmuir ou encore de précipitation par coalescence.

Ce mécanisme explique les bruines, beaucoup d'averses des pays tempérés ou tropicaux, les pluies de mousson. Le mécanisme de coalescence peut même se produire à une température inférieure à 0°C. Des chercheurs ont montré que la captation des gouttelettes entre elles est possible grâce à la présence d'un champ électrique (Dessens and Dessens, 1976). En effet, ils ont réalisé deux expériences : une sans champ électrique et une avec un champ électrique. Lors de l'expérience sans champ électrique, les gouttelettes tombent en s'évitant. Lors de l'expérience avec un champ électrique, les gouttelettes se captent entre elles et s'absorbent. L'observation de ce dernier phénomène est intéressante. Nous remarquons que les gouttelettes ne se captent pas suivant un mouvement descendant causé par les forces de gravité. Elles sont attirées une à une, le champ électrique les oriente. La gouttelette du haut ne capte pas forcément celle du bas, l'inverse peut aussi se produire. La gouttelette se trouvant en haut peut passer sous celle du bas et c'est finalement celle du bas qui capte celle du haut.

Le mécanisme de Langmuir se produit dans 10 % des cas; les 90 % de cas restants résultent du mécanisme de Bergeron.

IV-4-4-2. Mécanisme de Bergeron

Sous nos climats, la pluie est provoquée, en général, par le mécanisme de Bergeron. Sur la partie supérieure du nuage, les gouttelettes d'eau surfondues entre -20 et -25°C, vont distiller sur les cristaux de glace qui peuvent apparaître. Les cristaux augmentent de taille et atteignent la dimension nécessaire pour que le processus d'accrétion se produise. Le grossissement s'accélère. Le cristal de glace libère de l'énergie, les gouttes s'évaporent. Le cristal de glace grossit de plus en plus. Tout en grossissant, les cristaux tombent au travers du nuage, puis plus bas, vers le sol. Lorsqu'ils atteignent l'isotherme 0°C, les cristaux de

neige s'humidifient et se soudent en flocons de neige, pouvant renfermer jusqu'à une centaine de cristaux. En bas de l'isotherme 0°C, les flocons peuvent fondre avant d'atteindre le sol et donner des gouttes de bruine de 0,2 à 0,5 mm de diamètre ou des gouttes de pluie de 2,5 à 3 mm de diamètre (Laforte, 1998). Ce mécanisme de précipitation suppose un développement vertical du nuage suffisant.

L'observation en laboratoire (Dessens and Dessens, 1976) a permis de mettre en évidence le processus de congélation dans un nuage : "sur une lamelle qui porte un noyau glaçogène, se déposent des gouttelettes d'eau surfondues à -15°C; le noyau amorce la congélation par contact, et on voit aussitôt le petit cristal s'accroître, tandis que les gouttelettes surfondues environnantes s'évaporent (figure 21). La cause de ce phénomène est un transfert d'eau en phase vapeur vers la glace, provoqué par le déficit de pression de vapeur autour de la glace. Le cristal se transforme en flocon de neige, et il serait assez gros pour devenir sensible à l'action de la pesanteur et tomber vers le sol, constituant avec ses semblables une précipitation."

CHAPITRE V

PROPRIÉTÉS DE LA GLACE ATMOSPHERIQUE SUR UN CONDUCTEUR CYLINDRIQUE

Ce chapitre est consacré aux propriétés mécaniques et thermodynamiques de la glace atmosphérique sur un conducteur cylindrique.

V-1. RIGIDITÉ EN TORSION DU CONDUCTEUR

V-1-1. Forme du dépôt de glace

La rigidité en torsion d'un conducteur ou d'un câble a un effet sur la quantité de glace qui peut s'y déposer et sur la forme du manchon de glace.

En effet, lorsqu'un câble a une rigidité en torsion relativement faible, le câble est en rotation de façon progressive et régulière. Ceci entraîne une accumulation et une répartition uniformes de la glace sur le câble, créant un manchon de glace circulaire (figure 22). C'est le cas du câble de garde qui a une rigidité en torsion plus faible que le câble Bersimis. C'est pourquoi le câble de garde, de plus petit diamètre que le câble Bersimis (tableau 1), accumule davantage de glace que le câble Bersimis. Si un câble a une rigidité en torsion plus élevée, il tourne peu ou pas du tout. S'il est fixe, sa position stationnaire entraîne une répartition de la glace en manchon à tendance elliptique (figure 22).

En conclusion, un câble de faible rigidité en torsion est un conducteur tournant recouvert d'un manchon de glace de forme circulaire; un conducteur de rigidité en torsion plus élevée est un conducteur fixe recouvert d'un manchon de glace à tendance elliptique.

De plus, la répartition de la glace est différente au centre et aux extrémités du câble. La rotation en torsion du câble a plus d'effet au centre du câble qu'aux extrémités fixées au support. Donc, un câble ayant une rigidité en torsion relativement faible accumulera beaucoup plus de glace au centre. Ses manchons de glace seront à tendance elliptique aux extrémités du câble et à tendance circulaire au centre du câble.

V-1-2. Forme du dépôt de neige mouillée

En 1984 et 1985, dans le cadre d'une collaboration franco-japonaise entre EDF et le CRIEPI, des études expérimentales ont été réalisées en laboratoire lors des simulations d'accrétion de neige mouillée en soufflerie (Admirat et al., 1986; Gland et al., 1986). Les essais expérimentaux ont été effectués sur un conducteur toronné et sur un conducteur lisse.

V-1-2-1. Cas du conducteur toronné

Sur un conducteur toronné, la rigidité en torsion du conducteur influence la forme axiale ou cylindrique de l'accumulation de neige (Admirat et al., 1986; Admirat et al., 1990).

Si le conducteur a une forte rigidité en torsion, le conducteur est fixe et ne tourne pas. Nous avons donc une accrétion axiale de neige mouillée (figure 23). Dans ce cas, le dépôt se fragmente souvent spontanément sous l'action de sa propre masse.

Si le conducteur a une rigidité en torsion faible, le conducteur peut tourner librement sous l'effet du vent et de la surcharge du dépôt de neige. Dans ce cas, l'accrétion est cylindrique. La figure 24 illustre la formation d'un manchon dont la croissance peut être illimitée, sauf si des fragmentations et des chutes partielles se produisent, donnant à la croissance une allure en "dents de scie". Ce dernier phénomène se constate dans le cas de forte teneur en eau liquide dans la neige accrétée.

Au cours des essais sur le conducteur toronné, il n'a jamais été observé de glissement du manchon de neige autour du conducteur. Un très petit glissement du dépôt de neige a été observé uniquement si la teneur en eau liquide du dépôt de neige est très élevée.

V-1-2-2. Cas du conducteur lisse

La rigidité en torsion n'a aucun effet sur un conducteur lisse. Le manchon de neige glisse et tourne facilement autour du conducteur lisse, quelle que soit la rigidité en torsion du conducteur (figure 25).

V-2. ADHÉRENCE DE LA GLACE ET DE LA NEIGE

La durée de la phase de maintien va dépendre du type de glace formé sur le câble et de l'adhérence de ces types de glace sur le câble. Plus la glace adhèrera longtemps, plus la phase de maintien sera longue. La perte d'adhérence, couplée à l'effet du vent et aux variations de température, est une des causes principales des délestages pendant la phase de maintien.

V-2-1. Modes de rupture de la glace

Trois modes de rupture de la glace sont généralement observés :

- la rupture adhésive produite par cessation de l'adhésion à l'interface glace-matériau : la glace se détache de la surface du câble, laissant la surface du câble complètement dépourvue de glace.
- la rupture cohésive produite par brisure à l'intérieur de la glace.
- la rupture adhésive faisant suite à une rupture cohésive.

V-2-2. Théories de l'adhérence de la neige mouillée

Nous allons présenter plusieurs théories expliquant le phénomène d'adhérence de la neige mouillée sur un conducteur cylindrique.

Les études de Admirat and Sakamoto (1988) semblent confirmer que l'adhérence de la neige mouillée est d'origine capillaire, les cristaux de neige se transformant, au moment de l'impact, en grains de glace entourés d'eau. La neige mouillée tient ainsi au câble grâce à la tension capillaire de l'eau liquide qu'elle contient. La teneur en eau liquide, contenue dans le manchon de neige accrété, détermine les forces de tension en surface (ou forces capillaires) de la neige ainsi que les forces de cohésion de la matière. Une teneur en eau liquide élevée empêche la croissance de gros manchons en les forçant à se casser. Inversement, une teneur en eau liquide faible correspond à la cohésion maximale de la matière et permet la formation de gros et lourds manchons qui ne se cassent pas.

Pour Wareing and Bracey (1998), le mécanisme des charges de glace causant le plus de problèmes est celui dû à la neige mouillée en raison de son adhérence sur les structures. La teneur en eau liquide du flocon est un facteur critique sur la manière dont il colle sur les structures des lignes aériennes. Les pires cas de neige mouillée ont été observés pour des valeurs de teneur en eau comprises entre 15% et 40%.

Colbeck and Ackley (1982) ont montré que la condition nécessaire à l'adhérence de la neige mouillée sur un câble est la congélation ou la liaison des particules de neige mouillée entre-elles, lors du processus d'accrétion.

V-3. BILAN THERMODYNAMIQUE

Nous présentons le bilan thermodynamique d'un dépôt de glace sur un conducteur cylindrique ne transportant pas de courant électrique (Lozowski and Gayet, 1988; Laforte, 1998).

Soit un conducteur cylindrique tournant sur lequel se dépose de la glace atmosphérique. Nous allons déterminer la température T_d de la dernière couche de glace déposée en régime de croissance sèche (figure 26). À partir du premier principe de thermodynamique, nous allons écrire le bilan thermodynamique d'un dépôt de glace atmosphérique formé sur un cylindre tournant. Selon le premier principe, l'énergie produite à l'intérieur d'un système est égale à l'énergie perdue au sein du système :

$$\sum Q_{\text{SOURCES}} = \sum Q_{\text{PERTES}}$$

donc,

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_9 + Q_{10} \quad (5.1)$$

Q_1 est la chaleur latente de solidification, à la température de surface, de l'eau gelée captée par le cylindre à 0°C . Q_2 est la chaleur produite par le chauffage aérodynamique de l'air sur le dépôt ou friction de l'air. Q_3 est l'énergie cinétique des gouttelettes captées par le collecteur. Q_4 est la chaleur fournie lors du refroidissement de la glace à 0°C à la température T_d .

Q_5 est la chaleur perdue par conduction et convection thermique à l'interface du cylindre ou du dépôt de glace à la température T_s avec l'air à T_a . Q_6 est la chaleur latente perdue par sublimation de la glace en vapeur. Q_7 est la chaleur nécessaire pour réchauffer l'eau à la température d'équilibre en surface du dépôt de T_a (température de l'air négative) à 0°C . Q_8 est la chaleur perdue par conduction à travers le dépôt de glace et à travers le cylindre. Q_9 est la chaleur perdue par radiation. Q_{10} est la chaleur perdue par l'eau liquide captée par le cylindre mais entraînée de nouveau dans l'écoulement d'air.

Comme première hypothèse de ce modèle, nous considérons que l'eau gèle à 0°C . La seconde hypothèse est la condition " $T_d < 0^\circ\text{C}$ ", toute la masse d'eau captée par le cylindre gèle car le régime est à croissance sèche. Dans le cas d'un régime de croissance humide, la masse d'eau gelée est inférieure à la masse d'eau captée par le cylindre, l'eau restante non gelée ruisselle sur le cylindre. Ce modèle n'est donc valable que si la glace a gelé à 0°C et s'est ensuite refroidie à la température T_d .

Les gouttelettes d'eau présentes dans l'écoulement de l'air, de vitesse V , autour du cylindre, sont à la température T_a . Le cylindre tournant fait intervenir la constante π qui n'est pas impliquée dans le cylindre fixe. La section de capture du cylindre tournant est

$D L$, sa surface étant $\pi D L$ (D : diamètre de la surface de capture des gouttelettes, L : longueur du cylindre).

En première approximation, nous considérons que $T_s = T_d$ car ces deux températures sont sensiblement égales sur la dernière couche de glace. De plus, Q_2 , Q_3 , Q_8 , Q_9 , et Q_{10} peuvent être négligés.

$$\frac{Q_1}{\Delta t} + \frac{Q_4}{\Delta t} = \frac{Q_5}{\Delta t} + \frac{Q_6}{\Delta t} + \frac{Q_7}{\Delta t} \quad (5.2)$$

$$\frac{Q_1}{\Delta t} = I L_F D L$$

$$\frac{Q_4}{\Delta t} = - I C_i T_d D L$$

$$\frac{Q_5}{\Delta t} = h (T_d - T_a) L \pi D$$

$$\frac{Q_6}{\Delta t} = 0,28 Re^{0,63} . Sc^{0,33} . \frac{k}{D} . L_s . \Delta \rho . L . \pi . D$$

$$\frac{Q_7}{\Delta t} = - I D L C_w T_a$$

$$\Delta \rho = \frac{2,3 \times 10^{-4}}{K} . (T_d - T_a)$$

Avec T_a la température de l'air ($^{\circ}\text{C}$)

T_d la température de la glace déposée sur le conducteur ($^{\circ}\text{C}$)

V la vitesse du vent (m/s)

ϕ le diamètre des gouttelettes (m)

D_c le diamètre du cylindre (m)

e l'épaisseur radiale de la glace (m)

D le diamètre de la surface de capture des gouttelettes (m), $D = D_c + 2e$

L la longueur du cylindre (m)

- W** la teneur en eau liquide (kg/m^3)
 ρ_e la masse volumique de l'eau, $\rho_e = 1000 \text{ kg/m}^3$
 P_a la pression de l'air, $P_a = 1 \text{ atm}$
 ρ_a la masse volumique de l'air (kg/m^3), $\rho_a = P_a / (R \cdot T_a) = 1 / (0,0821 \cdot T_a)$
 μ_a la viscosité dynamique de l'air à 0°C , $\mu_a = 1,718 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$
 K_a la conductivité de l'air à 0°C , $K_a = 2,43 \times 10^{-2} \text{ J/m.s.}^\circ\text{C}$
 K paramètre inertiel, $K = \frac{V \phi^2 \rho_e}{9 \mu_a D}$
 E le coefficient de captation des gouttelettes d'eau, $E = \frac{K^2}{(K+0,7)^2}$
 I l'intensité de glaçage ou débit d'eau captée ($\text{kg/m}^2.\text{s}$), $I = E V W$
 L_F la chaleur latente de solidification de l'eau, $L_F (\text{à } 0^\circ\text{C}) = 3,34 \times 10^5 \text{ J/kg}$
 L_S la chaleur latente de sublimation de l'eau, $L_S (\text{à } 0^\circ\text{C}) = 2,8 \times 10^6 \text{ J/kg}$
 C_i la chaleur spécifique de la glace, $C_i (\text{à } 0^\circ\text{C}) = 2,07 \times 10^3 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$
 C_w la chaleur spécifique de l'eau, $C_w (\text{à } 0^\circ\text{C}) = 4,27 \times 10^3 \text{ J/kg.}^\circ\text{C}$
 Re le nombre de Reynolds du cylindre, $Re = \frac{V D \rho_a}{\mu_a}$
 Nu le nombre de Nusselt, $Nu = 0,28 Re^{0,63} \cdot Pr^{0,33}$
 Pr le nombre de Prandtl de l'air, $Pr = 0,711$
 Sc le nombre de Schmith de l'air, $Sc = 0,595$
 k la diffusivité de la vapeur d'eau, $k = 0,21 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
 h le coefficient de convection de l'air ($\text{J/m}^2.\text{s.}^\circ\text{C}$),

$$h = \frac{K_a \cdot Nu}{D} = 0,28 Re^{0,63} \cdot \frac{K_a}{D} \cdot Pr^{0,33}$$

 $\Delta\rho$ la variation de teneur en eau-vapeur par $^\circ\text{C}$ (kg/m^3)

Nous remplaçons les termes de l'équation (5.2) par leur expression littérale. Nous obtenons l'équation suivante :

$$I (L_F - C_i T_d + C_w T_a) D L = \pi D L (0,28 Re^{0,63} \cdot \frac{K_a}{D} \cdot Pr^{0,33}) \Delta T + \pi D L (0,28 Re^{0,63} \cdot Sc^{0,33} \cdot \frac{k}{D} \cdot L_s \cdot \Delta \rho) \Delta T \quad (5.3)$$

avec $\Delta T = T_d - T_a$

À partir de l'équation (5.3), nous pouvons déduire la température négative T_d de la glace déposée sur le conducteur tournant. Dans le cas d'un câble électrifié de transport électrique, il faudrait considérer comme paramètre supplémentaire la chaleur dissipée par effet Joule par le câble.

CHAPITRE VI

CRITÈRES D'IDENTIFICATION DE LA PHASE DE MAINTIEN

VI-1. CRITÈRE DE DÉBUT DE PHASE DE MAINTIEN

VI-1-1. Énoncé du critère

Le critère de début de phase de maintien est commun avec celui de fin de phase d'accrétion : "la charge de glace finale de la phase d'accrétion est la charge initiale d'une possible phase de maintien de la glace" (Portaix, 1999). Ce critère a donc été réalisé en collaboration avec Christophe Portaix. Il repose sur l'observation des graphes de masse de glace (en kg/m) en fonction du temps pour chaque câble. Il est indépendant des conditions météorologiques propres à chaque événement. La difficulté a été d'élaborer le critère le plus objectif possible, applicable à tous les événements, quels que soient la saison considérée et le type de câble, et de ne pas empiéter matériellement sur une phase au détriment d'une autre.

Le critère de fin de phase d'accrétion est défini à partir d'un seuil relatif à la masse de glace délestée et aussi à partir d'une durée critique. 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, le critère doit être appliqué:

- Si le taux local est nul, cela signifie que la charge de glace se maintient de façon constante sur le câble. 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.
- Si le taux local est négatif, cela signifie que la charge déleste. Notons S la quantité de glace délestée par rapport à la charge de glace accrétée juste avant le délestage, exprimée en %.

$$S = \frac{(W_i - W_f)}{W_i} \times 100$$

Avec W_i la charge de glace avant le délestage (kg/m)

W_f la charge de glace en fin de délestage (kg/m)

Tant que S est inférieur à 25 %, la phase d'accrétion continue; sinon elle s'arrête avant ce délestage.

Dans tous ces cas, la condition nécessaire pour que la phase d'accrétion continue est la suivante: la nouvelle accrétion, consécutive au délestage ou à la période de maintien, doit comporter une charge finale supérieure à celle atteinte juste avant le délestage ou le maintien, et de valeur suffisamment importante par rapport à cette dernière pour considérer cette évolution de charge de glace comme un phénomène d'accrétion. Cette condition s'applique à l'accrétion qui se situe tout de suite après le délestage.

Le seuil S a été choisi en étudiant les fractions de masse délestée pour toute la base de données du Mont Valin.

VI-1-2. Exemples

Pour le premier événement de la figure 27, la phase d'accrétion se termine au point A, le 11/10/93 à 8 :30, quel que soit le pourcentage S de masse de glace délestée entre A et B car la valeur de la masse de glace au point C est inférieure à la valeur en A.

Pour le deuxième événement de la figure 27, la phase d'accrétion se termine au point D (le 23/10/93 à 8 :30) car S est égal à 37% entre D et E. Si S était inférieur à 25 %, alors, la phase d'accrétion se terminerait en F.

Sur la figure 28, la phase d'accrétion se termine au point A, le 21/10/97 à 12 :30 car la période de maintien juste après le point A dure plus de 24 heures.

La figure 29 présente un événement où le choix de la fin de la phase d'accrétion est ambigu. Entre les points A et B, la période de maintien dure moins de 24 heures. Donc la phase d'accrétion continue après le point B. Le maintien est suivi d'une nouvelle accrétion qui commence en B et se termine en C. La valeur de la masse de glace en C est supérieure à celle en A, mais pas de manière significative par rapport à celle en A. Par conséquent, la phase d'accrétion se termine en A (le 21/2/94 à 8 :00) et non en C.

VI-2. CRITÈRE DE FIN DE PHASE DE MAINTIEN

Lorsque l'événement est composé des trois phases successives (phase d'accrétion, phase de maintien et phase de délestage), alors la fin de la phase de maintien coïncide avec le début de la phase de délestage. Dans le cas où l'événement est composé uniquement d'une phase d'accrétion et d'une phase de maintien, sans phase de délestage, la phase de maintien se termine à partir d'un seuil minimal de la charge de glace qui suppose que le maintien n'existe plus.

Dans cette partie, nous allons énoncer le critère de fin de phase de maintien dans le cas où l'événement comprend une phase de délestage, puis dans le cas où l'événement est sans phase de délestage.

VI-2-1. Événements avec phase de délestage

VI-2-1-1. Énoncé du critère

Dans le cas où l'événement comprend une phase de délestage, la phase de maintien s'arrête avant le début du dernier délestage important ou rapide de l'événement, caractérisé par:

- un délestage par fonte,
- ou un délestage par bris mécanique,
- ou un délestage par sublimation.

La phase de maintien se termine à partir du moment où la glace se déleste jusqu'à la fin de la période et sans aucune accrétion partielle pendant ce délestage. La phase de délestage ne doit pas comporter d'accrétions partielles, car sinon elle pourrait s'apparenter à du maintien. Cette phase est, par définition, du délestage à l'état pur. La phase de délestage ne doit pas prêter à confusion, elle doit être évidente et ne pas empiéter sur la phase de maintien.

VI-2-1-2. Exemples

Appliquons le critère à l'événement du 22 au 28 octobre 1993, sur le câble Bersimis (figure 30). La phase de maintien se termine au point B et non au point A car entre le point A et le point B, le taux de délestage est relativement faible. Or, le critère s'applique pour un délestage important, donc au point B.

Dans les exemples qui suivent, la phase de maintien prend fin au point C (figures 31-35). Sur les figures 31 et 32, la phase de délestage est caractérisée par un délestage de type fonte. La phase de maintien se termine le 21/2/96 à 3 :00 (figure 31), et le 26/4/95 à 6 :00 (figure 32). Sur les figures 33 et 34, la phase de délestage est caractérisée par un délestage de type bris mécanique. La phase de maintien se termine le 9/3/96 à 14 :30 (figure 33), et le 20/2/95 à 13 :00 (figure 34). Sur la figure 35, la phase de délestage est caractérisée par un délestage de type sublimation. La phase de maintien se termine le 11/2/94 à 6 :30.

VI-2-1-3. Cas particulier

La figure 36 illustre un cas particulier dans lequel il est difficile de déterminer la fin de la phase de maintien et donc le début de la phase de délestage entre les points A et F. Entre B et C, il y a une accréation, la température est négative, le vent perpendiculaire est de direction Est et oscille entre 15 et 30 km/h. Mais, entre D et E, la température se situe entre 4 et 9°C. L'accréation apparente sur le graphe n'est donc pas une vraie accréation du point de vue atmosphérique. Cela est probablement dû à l'effet du vent perpendiculaire de secteur Est qui commence à 40 km/h et se termine à 60 km/h au point E. La phase de maintien se termine donc au point C. Dans ce cas là, nous ne pouvons pas appliquer le critère de fin de phase de maintien.

Cet exemple soulève un point intéressant : les critères doivent être appliqués en tenant compte de tous les paramètres météorologiques qui sont propres à l'événement de glace atmosphérique.

VI-2-2. Événements sans phase de délestage

VI-2-2-1. Observations

Pour un événement ne comprenant pas une phase de délestage, la phase de maintien se termine à la fin de l'événement. Ces cas, peu fréquents, se produisent :

- lorsque la glace se maintient de façon constante sur le câble et que la charge de glace diminue faiblement au fil des jours ou des heures; cette diminution de la charge de glace est tellement minime qu'elle n'apparaît pas sur le graphe de masse de glace (figure 37);
- lorsque la réduction de la charge de glace est relativement faible, de sorte qu'elle n'est pas considérée comme un délestage pur, mais comme du maintien (figure 38).

Dans les deux cas, la charge de glace diminue sur le câble et atteint une valeur très faible en fin de maintien. Nous avons utilisé les enregistrements sur cassettes vidéo afin de vérifier la présence de la glace sur les câbles lorsque les valeurs étaient très faibles. De la glace a été observée sur les câbles pour des valeurs de charge de glace supérieures à 0,05 kg/m, mais pas en dessous de cette valeur.

VI-2-2-2. Énoncé du critère

Dans le cas où l'événement ne comprend pas de phase de délestage, la phase de maintien continue tant que la valeur de la charge de glace est supérieure à 0,05 kg/m et tant qu'il n'y a pas un nouvel événement.

VI-2-2-3. Exemples

Appliquons ce critère à l'événement du 18 au 20 décembre 1995 (figure 37) à l'aide du tableau 7 de la page suivante : la phase de maintien se termine le 20/12/95 à 21 :00 car à 21 :30 la charge de glace est égale à 0,049 kg/m et donc inférieure à 0,05 kg/m.

Tableau 7 : Identification de la fin de la phase de maintien (câble Bersimis),
événement du 18 au 20 décembre 1995

date	température (°C)	charge de glace (kg/m)
95/12/20 04:00	-10,8	0,077
95/12/20 04:30	-10,4	0,074
95/12/20 05:00	-10	0,074
95/12/20 05:30	-9,9	0,071
95/12/20 06:00	-10,1	0,071
95/12/20 06:30	-10	0,071
95/12/20 07:00	-10,2	0,074
95/12/20 07:30	-10,2	0,074
95/12/20 08:00	-10,9	0,077
95/12/20 08:30	-10,8	0,074
95/12/20 09:00	-10,1	0,074
95/12/20 09:30	-10,3	0,071
95/12/20 10:00	-10	0,074
95/12/20 10:30	-9,6	0,071
95/12/20 11:00	-10,2	0,069
95/12/20 11:30	-9,7	0,066
95/12/20 12:00	-8,6	0,060
95/12/20 12:30	-8,5	0,060
95/12/20 13:00	-7,8	0,057
95/12/20 13:30	-7,5	0,060
95/12/20 14:00	-7,9	0,063
95/12/20 14:30	-8,8	0,066
95/12/20 15:00	-8,3	0,066
95/12/20 15:30	-7,9	0,063
95/12/20 16:00	-7,6	0,057
95/12/20 16:30	-7,5	0,057
95/12/20 17:00	-7,5	0,057
95/12/20 17:30	-7,4	0,054
95/12/20 18:00	-7,2	0,051
95/12/20 18:30	-7,1	0,054
95/12/20 19:00	-7,2	0,051
95/12/20 19:30	-7,1	0,051
95/12/20 20:00	-6,9	0,051
95/12/20 20:30	-6,6	0,051
95/12/20 21:00	-6,4	0,054
95/12/20 21:30	-6,2	0,049
95/12/20 22:00	-6	0,051
95/12/20 22:30	-5,8	0,051
95/12/20 23:00	-5,8	0,046
95/12/20 23:30	-5,7	0,049

Appliquons ce critère à l'événement de janvier à février 1993 (figure 38) à l'aide du tableau 8 : la phase de maintien se termine le 2/2/93 à 21 :30 car un événement nouveau lui succède.

Tableau 8 : Identification de la fin de la phase de maintien (câble Bersimis), événement de janvier à février 1993

date	température (°C)	charge de glace (kg/m)
93/ 2/ 2 17:00	-16,6	0,070
93/ 2/ 2 17:30	-16,2	0,070
93/ 2/ 2 18:00	-15,7	0,070
93/ 2/ 2 18:30	-15,5	0,067
93/ 2/ 2 19:00	-15,5	0,067
93/ 2/ 2 19:30	-15,7	0,067
93/ 2/ 2 20:00	-15,6	0,064
93/ 2/ 2 20:30	-15,4	0,061
93/ 2/ 2 21:00	-15,7	0,056
93/ 2/ 2 21:30	-16,2	0,053
93/ 2/ 2 22:00	-16,9	0,056
93/ 2/ 2 22:30	-17,5	0,056
93/ 2/ 2 23:00	-17,6	0,056
93/ 2/ 2 23:30	-17,6	0,058
93/ 2/ 3 00:00	-17,5	0,061
93/ 2/ 3 00:30	-17,5	0,064

VI-3. IDENTIFICATION DE DEUX ÉVÉNEMENTS INDÉPENDANTS

La fin de la phase de maintien dépend, en partie, de la fin de l'événement. Dans ce qui suit, nous allons voir de quelle manière la phase de maintien et la fin de l'événement sont liées.

À partir des graphes de masse de glace et des cassettes vidéos de la station du Mont Valin, nous avons observé que la charge de glace ne disparaît pas complètement entre deux événements, la glace restant présente sur le câble en très faibles quantités, de l'ordre de 0,05 kg/m à 0,06 kg/m. La difficulté est de déterminer si nous devons considérer ces deux événements comme deux événements indépendants ou bien considérer qu'ils font partie du même et unique événement. Présentons quelques exemples illustrant ce problème (figures 39-41).

Sur la figure 39, l'événement de décembre 92/janvier 93 commence le 20/12/92. La difficulté est de déterminer la fin de l'événement parmi ces deux dates possibles : le 3/1/93 ou bien plus tard le 22/1/93. Le 3/1/93 à 15 :00, la charge de glace a une valeur égale à 0,054 kg/m. Cette valeur est trop faible pour considérer que cela fait partie du maintien et ainsi que la phase de maintien continue après le 3 janvier. En effet, le 4 janvier, une nouvelle accréation recommence. D'un point de vue scientifique, considérer que la phase de maintien continue au-delà du 3 janvier n'a aucun intérêt car ce n'est pas vraiment du maintien, la glace étant pratiquement délestée sur le câble. Par conséquent, l'événement se termine le 3/1/93 à 15 :00.

Sur la figure 40, le problème est identique au cas précédent. Il faut déterminer si l'événement débutant le 2/12/96 se termine le 13/12/96 ou bien continue au-delà de ce jour. La charge de glace se maintient de façon constante du 13/12/96, 22 :30 au 14/12/96, 15 :00 et atteint une valeur minimale égale à 0,059 kg/m le 14/12/96 de 10 :00 à 10 :30. Étant donné que la charge de glace est présente en très faible quantité sur le câble de garde, cela ne peut pas être considéré comme du maintien. L'événement se termine donc le 13/12/96 à 22 :30. La figure 41 présente le même événement sur le câble Bersimis. Du 13/12/96, 21 :30 au 14/12/96, 16 :00, la charge de glace se maintient de façon continue et atteint une valeur minimale égale à 0,171 kg/m, soit plus de 16 kg au total sur le câble Bersimis. Dans

ce cas, l'événement ne se termine pas le 13/12/96 et la phase de maintien continue au-delà du 13/12/96.

Ce raisonnement intuitif est en accord avec l'étude du seuil des petites tempêtes réalisée par Portaix (1999). Le seuil est égal à 0,061 kg/m. En dessous de cette valeur, il est préférable d'éliminer des variations douteuses du signal de la cellule de charge. Ce seuil mesure la variation du signal de la cellule de charge induite par les efforts aérodynamiques du vent sur le câble, la dilatation thermique et les instabilités électroniques et électriques de l'instrumentation, sans présence de glace sur le câble.

VI-4. IDENTIFICATION DE LA SUBLIMATION PENDANT LA PHASE DE MAINTIEN

Le phénomène de sublimation, correspondant à une réduction de la charge de glace, est parfois observé pendant la phase de maintien (figures 42-43).

De façon pratique, pour identifier des phénomènes de sublimation, il faut s'assurer que nous étudions une période où la température reste négative, que la variation totale de la charge de glace est largement supérieure à la valeur-seuil et que le taux de décroissance de la charge de glace reste faible. Afin de vérifier les deux dernières conditions, il est nécessaire de ne s'intéresser qu'aux événements de sublimation s'étendant sur au moins deux jours consécutifs (Bernardin, 1989).

À partir des données du Mont Valin, nous observons que le phénomène de sublimation peut durer plusieurs jours, parfois plus d'un mois et se produit très souvent pendant les mois de janvier et de février car pendant ces mois la température reste négative pendant de nombreux jours et favorise ainsi la sublimation.

CHAPITRE VII

CRITÈRES D'IDENTIFICATION DES TYPES DE GLACE ET DES MÉLANGES PENDANT LA PHASE DE MAINTIEN

Nous présentons les critères utilisés dans l'identification du givre, du verglas, de la neige mouillée et des mélanges de ces types de glace pendant la phase de maintien.

VII-1. IDENTIFICATION DU GIVRE, DU VERGLAS ET DE LA NEIGE MOUILLÉE

VII-1-1. Différenciation du givre et du verglas

Comme en témoignent les publications diverses et les nombreux travaux scientifiques sur la glace atmosphérique, il est difficile de donner des plages de températures sur les conditions de formation du verglas, du givre lourd et du givre léger. Dans le chapitre IV, nous avons vu que les gouttelettes de bruine ou de pluie verglaçante à l'origine de la formation du verglas sont à une température comprise entre 0 et -3°C. Dans les nuages givrants, les gouttelettes favorisant la formation de givre lourd sont à une température comprise entre -3 et -15°C, celles favorisant la formation du givre léger sont à une température comprise entre -5 et -25°C.

En tenant compte de ces conditions, nous pouvons supposer que la température des gouttelettes est sensiblement la même que la température de l'air ambiant et considérer que

le verglas se forme entre 0 et -3°C , et le givre entre -3 et -25°C . Mais, au Québec, il est fréquent d'observer du verglas à -5°C .

Afin de différencier le verglas du givre, il faut tenir compte des précipitations du pluviomètre et des alarmes du givromètre (Druez et al., 1995). Voici la démarche à suivre pour reconnaître un type de glace :

- Si le pluviomètre n'indique aucune précipitation et que la température de l'air est négative, la glace est probablement du givre. Cette hypothèse est vérifiée avec certitude si le givromètre indique des alarmes. Il faut aussi envisager le cas où le givromètre est complètement gelé par la glace et donc n'indique aucune alarme bien qu'en réalité il y en ait comme, par exemple, le 11/11/93 à 12 :00. Le givre s'accumule horizontalement car il résulte du passage de nuages givrants. Il s'accumule donc principalement sur la partie latérale de la sonde du givromètre, partie plus importante en surface que la partie supérieure de la sonde.
- Si des précipitations sont détectées par le pluviomètre et des alarmes par le givromètre, la glace est probablement du verglas.

Le pluviomètre et le givromètre constituent ainsi des aides très précieuses en indiquant la nature de la glace atmosphérique présente au Mont Valin (Druez and McComber, 1991).

De plus, nous utilisons les cassettes vidéo pour observer l'apparence du dépôt de glace sur les câbles et les conditions atmosphériques présentes pendant la formation de la glace (présence de nuages givrants, confirmation du début d'une tempête et donc d'une accumulation de glace).

En conclusion, le givre et le verglas sont identifiés en grande partie grâce au pluviomètre, au givromètre, en tenant compte de la température de l'air ambiant et des enregistrements vidéos.

VII-1-2. Identification de la neige mouillée

Dans la base de données, la neige mouillée est identifiée lorsque la température de l'air est supérieure ou égale à 0°C avec des précipitations enregistrées par le pluviomètre. Le givromètre indique parfois des alarmes.

Il faut être prudent avant de conclure à la présence de neige mouillée et vérifier s'il y a véritablement une accréation de neige mouillée. En effet, à une température positive, la dilatation thermique entraîne la fluctuation du signal de la cellule de charge, ce qui peut s'apparenter à une accréation même si ce n'en est pas. Le vent peut aussi être à l'origine de la perturbation du signal.

VII-2. LES TAUX D'ACCRÉTION PAR TYPE DE GLACE

À partir des rapports des saisons de givrage 1992-1993, 1993-1994 et 1994-1995 (Druez and McComber, 1993 et 1994; Druez and Boudreault, 1996 et 1997), nous avons réalisé une étude préliminaire sur les taux d'accréation du givre et des précipitations afin d'obtenir des ordres de grandeur sur le taux d'accréation du givre, du verglas et de la neige mouillée. Ceci permettra d'identifier les types de glace accrés pendant la phase de maintien.

VII-2-1. Classification distincte du verglas et de la neige mouillée

Dans ces rapports, les taux d'accrétion sont donnés pour deux catégories : le givre et les précipitations. Les précipitations regroupent le verglas, la neige mouillée et les mélanges de verglas et de neige mouillée.

Nous avons regroupé les valeurs des taux d'accrétion des trois rapports par catégorie de givre et de précipitation, pour le câble Bersimis, un câble du faisceau, le câble de garde et le câble témoin. Dans le cas des précipitations, nous cherchons à déterminer le type précis de précipitation, soit du verglas, soit de la neige mouillée ou un mélange des deux. Nous avons donc analysé chaque précipitation de la manière suivante : si l'accrétion se produit à température positive, alors, il s'agit d'une accrétion de neige collante. La présence de neige mouillée a été confirmée à l'aide des enregistrements sur cassettes vidéo. De plus, nous avons constaté que la neige mouillée avait une tendance à se coller sur la caméra. Pendant les saisons 1992-1993, 1993-1994, 1994-1995, nous avons trouvé peu d'événements de neige mouillée. Dans les cas d'accrétion de neige mouillée observés, l'accrétion de neige mouillée fait suite à une accrétion de verglas, ou l'inverse, mais se retrouve rarement seule. Ces événements ont été considérés comme des événements de neige mouillée pour les différencier des événements de verglas seul.

VII-2-1-1. Accrétion de neige mouillée

Les cas de neige mouillée observés se sont produits pendant les mois d'octobre, de novembre et de mai. Les tableaux 9 à 11 présentent trois événements de neige mouillée.

Tableau 9 : Accrétion de neige mouillée (octobre 1992)

date	température (°C)	charge de glace (kg/m) câble Bersimis	charge de glace (kg/m) câble de garde	nombre d'alarmes	précipitations (mm)	vitesse du vent perpendiculaire (km/h)
92/10/16 13:30	-0,5	0,08	0,03	0	0	-32,00
92/10/16 14:00	-0,5	0,18	0,09	1	1,75	-34,56
92/10/16 14:30	-0,6	0,27	0,15	7	3,5	-36,54
92/10/16 15:00	-0,8	0,35	0,21	8	4,5	-36,48
92/10/16 15:30	-0,5	0,42	0,27	9	6	-36,37
92/10/16 16:00	-0,1	0,47	0,32	13	7,25	-41,71
92/10/16 16:30	0	0,52	0,37	17	8,5	-38,22
92/10/16 17:00	0	0,56	0,40	18	9	-39,41
92/10/16 17:30	0,1	0,60	0,43	19	10,5	-39,63
92/10/16 18:00	0,1	0,61	0,44	23	12	-40,09
92/10/16 18:30	0,2	0,63	0,46	25	12,75	-38,20

Tableau 10 : Accrétion de neige mouillée (novembre 1992)

date	température (°C)	charge de glace (kg/m) câble Bersimis	charge de glace (kg/m) câble de garde	nombre d'alarmes	précipitations (mm)	vitesse du vent perpendiculaire (km/h)
92/11/12 22:30	-1,2	0,20	0,53	0	0	-35,30
92/11/12 23:00	-1,2	0,23	0,59	4	0	-39,87
92/11/12 23:30	-0,7	0,34	0,70	15	0,5	-41,89
92/11/13 00:00	-0,5	0,45	0,86	33	2	-39,25
92/11/13 00:30	-0,3	0,54	1,01	51	3,5	-41,94
92/11/13 01:00	-0,1	0,58	1,05	64	4,25	-45,21
92/11/13 01:30	0	0,62	1,09	74	4,25	-41,93
92/11/13 02:00	0,3	0,66	1,17	81	5	-42,61

Tableau 11 : Accrétion de neige mouillée (octobre 1994)

date	température (°C)	charge de glace (kg/m) câble Bersimis	charge de glace (kg/m) câble de garde	nombre d'alarmes	précipitations (mm)	vitesse du vent perpendiculaire (km/h)
94/10/ 2 16:30	-0,6	0,04	0,03	0	0	22,60
94/10/ 2 17:00	-0,8	0,04	0,04	3	0	26,23
94/10/ 2 17:30	-0,8	0,06	0,05	8	0	27,07
94/10/ 2 18:00	-0,9	0,06	0,06	13	0	27,15
94/10/ 2 18:30	-1	0,07	0,06	18	0	27,21
94/10/ 2 19:00	-1	0,09	0,07	24	0	24,71
94/10/ 2 19:30	-1	0,10	0,09	30	0	25,85
94/10/ 2 20:00	-1	0,13	0,10	35	0,25	24,99
94/10/ 2 20:30	-1	0,14	0,11	41	0,25	24,68
94/10/ 2 21:00	-1	0,17	0,14	48	0,25	23,53
94/10/ 2 21:30	-1	0,19	0,16	58	0,25	23,58
94/10/ 2 22:00	-1	0,21	0,17	66	0,25	22,14
94/10/ 2 22:30	-0,9	0,23	0,19	74	0,25	21,83
94/10/ 2 23:00	-0,8	0,25	0,21	81	0,25	20,03
94/10/ 2 23:30	-0,7	0,26	0,22	88	0,25	15,04
94/10/ 3 00:00	-0,6	0,28	0,24	94	0,25	11,56
94/10/ 3 00:30	-0,4	0,29	0,25	100	0,25	12,76
94/10/ 3 01:00	-0,3	0,30	0,26	104	0,25	10,61
94/10/ 3 01:30	-0,1	0,30	0,27	108	0,25	13,24
94/10/ 3 02:00	0	0,31	0,27	112	0,25	11,53
94/10/ 3 02:30	0,2	0,31	0,28	115	0,25	10,64
94/10/ 3 03:00	0,2	0,31	0,29	115	0,25	12,09
94/10/ 3 03:30	0,4	0,32	0,27	116	0,25	11,43

Dans le tableau 9, l'accrétion est une accrétion de verglas suivie d'une accrétion de neige mouillée, cette dernière débutant à 16 :30. La température moyenne de cette accrétion est $-0,2^{\circ}\text{C}$. Les valeurs du taux d'accrétion moyen du câble Bersimis et du câble de garde sont respectivement 110 g/m.h et 86 g/m.h.

Dans le tableau 10, l'accrétion est une accrétion de verglas suivie d'une accrétion de neige mouillée, cette dernière débutant à 1 :30. La température moyenne de cette accrétion est $-0,5^{\circ}\text{C}$. Les valeurs du taux d'accrétion moyen du câble Bersimis et du câble de garde sont respectivement 131 g/m.h et 182 g/m.h.

Dans les tableaux 9 et 10, la vitesse du vent perpendiculaire correspond à un vent perpendiculaire de direction Est car la vitesse du vent perpendiculaire est de signe négatif.

Dans le tableau 11, l'accrétion est une accrétion de verglas suivie d'une accrétion de neige mouillée, cette dernière débutant à 2 :00. La température moyenne de cette accrétion est $-0,6^{\circ}\text{C}$. Sur le câble de garde, l'accrétion se termine à 3 :00 et dure donc 30 minutes de moins que sur le câble Bersimis. Les valeurs du taux d'accrétion moyen du câble Bersimis et du câble de garde sont respectivement 26 g/m.h et 24 g/m.h. La vitesse du vent perpendiculaire correspond à un vent perpendiculaire de direction Ouest car la vitesse du vent perpendiculaire est de signe positif.

VII-2-1-2. Accrétion de verglas

Le tableau 12 présente une accrétion de verglas.

Tableau 12 : Accrétion de verglas (novembre 1992)

date	température (°C)	charge de glace (kg/m) câble Bersimis	charge de glace (kg/m) câble de garde	nombre d'alarmes	précipitations (mm)	vitesse du vent perpendiculaire (km/h)
92/11/21 14:00	-4,1	0,01	0,03	0	0	-10,81
92/11/21 14:30	-4,5	0,02	0,04	1	0	-13,49
92/11/21 15:00	-4,4	0,03	0,05	3	0	-13,10
92/11/21 15:30	-3,9	0,05	0,06	5	0	-12,17
92/11/21 16:00	-3,4	0,06	0,06	8	0	-12,14
92/11/21 16:30	-2,8	0,07	0,07	10	0,5	-12,48
92/11/21 17:00	-2,6	0,07	0,07	12	0,75	-12,92
92/11/21 17:30	-2,2	0,07	0,07	14	1	-12,23
92/11/21 18:00	-1,9	0,09	0,09	16	2,25	-12,66
92/11/21 18:30	-1,7	0,10	0,09	20	3,25	-14,10
92/11/21 19:00	-1,4	0,12	0,11	23	4	-12,30
92/11/21 19:30	-0,8	0,19	0,17	31	5,75	-10,65
92/11/21 20:00	-0,6	0,24	0,23	42	7,75	-10,82
92/11/21 20:30	-0,2	0,27	0,26	52	9,75	-7,06

La température moyenne de cette accrétion est $-2,5^{\circ}\text{C}$. Les valeurs du taux d'accrétion moyen du câble Bersimis et du câble de garde sont respectivement 41 g/m.h et 35 g/m.h . La vitesse du vent perpendiculaire correspond à un vent perpendiculaire de direction Est car la vitesse du vent perpendiculaire est de signe négatif.

VII-2-2. Présentation des résultats

VII-2-2-1. Caractéristiques du taux d'accrétion

Le tableau 13 suivant présente les valeurs du taux d'accrétion (en g/m.h) classées par type de câble et par type de glace, pour les saisons 1992-1993, 1993-1994 et 1994-1995.

Tableau 13 : Caractéristiques du taux d'accrétion en g/m.h

		type de glace		
		givre	verglas	neige mouillée
câble Bersimis	nombre de cas	47	25	5
	minimum	1	3	4
	maximum	102	166	141
	moyenne	18,9	46,6	66,2
	écart-type	20,1	48,2	56,7
un câble du faisceau	nombre de cas	51	26	5
	minimum	1	3	4
	maximum	59	153	118
	moyenne	13,1	37,5	56,4
	écart-type	13,2	41,1	51,5
câble de garde	nombre de cas	52	26	5
	minimum	1	6	3
	maximum	124	132	193
	moyenne	26	39,6	75,2
	écart-type	25,1	33,5	73,6
câble témoin	nombre de cas	52	26	5
	minimum	1	1	1
	maximum	59	53	52
	moyenne	10	16,3	21
	écart-type	11,4	14,8	20,1

Il y a principalement des événements de givrage, puis de verglas et très peu d'événements de neige mouillée. À priori, cela semble normal car le site du Mont-Valin est un site d'étude du givrage.

VII-2-2-1-1. Valeur maximale du taux d'accrétion

Sur le câble Bersimis et sur le câble du faisceau, la valeur maximale du taux d'accrétion est obtenue pour du verglas (166 g/m.h sur le câble Bersimis, et 153 g/m.h sur un câble du faisceau). Sur le câble de garde, la valeur maximale du taux d'accrétion est obtenue pour de la neige mouillée (193 g/m.h). Sur le câble témoin, la valeur maximale du taux d'accrétion est obtenue pour du givre (59 g/m.h).

Dans le cas du givre, la valeur maximale du taux d'accrétion est, dans l'ordre décroissant, sur le câble de garde (124 g/m.h), le câble Bersimis (102 g/m.h), le câble du faisceau et le câble témoin (59 g/m.h sur ces deux câbles). Dans le cas du verglas, la valeur maximale du taux d'accrétion est, dans l'ordre décroissant, sur le câble Bersimis (166 g/m.h), le câble du faisceau (153 g/m.h), le câble de garde (132 g/m.h) et le câble témoin (53 g/m.h). Dans le cas de la neige mouillée, la valeur maximale du taux d'accrétion est, dans l'ordre décroissant, sur le câble de garde (193 g/m.h), le câble Bersimis (141 g/m.h), le câble du faisceau (118 g/m.h) et le câble témoin (52 g/m.h).

VII-2-2-1-2. Valeur minimale du taux d'accrétion

Sur le câble Bersimis et sur le câble du faisceau, la valeur minimale du taux d'accrétion est, dans l'ordre décroissant, plus élevée pour la neige mouillée (4 g/m.h), ensuite pour le verglas (3 g/m.h) et finalement pour le givre (1 g/m.h). Sur le câble de garde, la valeur minimale du taux d'accrétion est, dans l'ordre décroissant, plus élevée pour le verglas (6 g/m.h), ensuite pour la neige mouillée (3 g/m.h) et finalement pour le givre (1 g/m.h). Sur le câble témoin, la valeur minimale du taux d'accrétion est identique (1 g/m.h), quel que soit le type de glace.

Dans le cas du givre, la valeur minimale du taux d'accrétion est la même, pour tous les câbles (1 g/m.h). Dans le cas du verglas, la valeur minimale du taux d'accrétion est, dans l'ordre décroissant, plus élevée sur le câble de garde (6 g/m.h), ensuite sur le câble Bersimis et le câble du faisceau (3 g/m.h), et plus basse sur le câble témoin (1 g/m.h). Dans le cas de la neige mouillée, la valeur minimale du taux d'accrétion est, dans l'ordre décroissant, plus élevée sur le câble Bersimis et sur le câble du faisceau (4 g/m.h), ensuite sur le câble de garde (3 g/m.h), et plus basse sur le câble témoin (1 g/m.h).

VII-2-2-1-3. Valeur moyenne du taux d'accrétion

Les valeurs moyennes du taux d'accrétion ne représentent pas de façon précise les données du taux d'accrétion en raison de la diversité des valeurs. Globalement, l'écart-type est très élevé par rapport à la moyenne.

Dans le cas de la neige mouillée, la moyenne et l'écart-type ne sont pas significatifs car nous n'avons pas assez d'échantillons de neige mouillée.

Sur tous les câbles, la valeur moyenne du taux d'accrétion est, dans l'ordre décroissant, plus élevée pour la neige mouillée, ensuite pour le verglas et finalement pour le givre.

Dans le cas du givre et de la neige mouillée, la valeur moyenne du taux d'accrétion est, dans l'ordre décroissant, plus élevée sur le câble de garde, sur le câble Bersimis, sur le câble du faisceau et sur le câble témoin. Dans le cas du verglas, la valeur moyenne du taux d'accrétion est, dans l'ordre décroissant, plus élevée sur le câble Bersimis, sur le câble de garde, sur le câble du faisceau et sur le câble témoin.

VII-2-2-2. Distribution du taux d'accrétion

Nous désirons obtenir des ordres de grandeur sur le taux d'accrétion du givre, du verglas et de la neige mouillée afin d'être en mesure d'identifier plus clairement les types de glace accrétés pendant la phase de maintien. Le tableau 13 sera utilisé en tenant compte des valeurs maximales et minimales du taux d'accrétion. Une étude des taux d'accrétion par classe semble plus appropriée et plus utile. Les figures 44 à 46 montrent la répartition des taux d'accrétion pour chaque type de glace (givre, verglas, neige mouillée) et chaque type de câble (câble Bersimis, un câble du faisceau, câble de garde, câble témoin), par classe de 10 g/m.h. La figure 46 est moins significative que les deux autres car l'échantillonnage est trop faible dans le cas de la neige mouillée.

Si nous comparons la figure 44 (cas du givre) et la figure 45 (cas du verglas), nous constatons que plus le taux d'accrétion est élevé, moins il y a d'échantillons pour le givre par rapport au verglas.

Dans le cas du givre (figure 44), il n'y a pas de valeur de taux d'accrétion au-delà de 61 g/m.h sur le câble du faisceau et sur le câble témoin à la différence du câble Bersimis et du câble de garde. De plus, la majorité des valeurs du taux d'accrétion sont réparties dans la plus petite classe (de 1 à 11 g/m.h) pour le câble Bersimis (50 %), le câble du faisceau (60%), et le câble témoin (plus de 70 %). Le câble de garde fait exception à cette observation avec seulement 30 % de cas dans la classe de 1 à 11 g/m.h.

Dans le cas du verglas (figure 45), il n'y a plus de valeur de taux d'accrétion au-delà de 141 g/m.h sur le câble de garde à la différence du câble Bersimis et du câble du faisceau. Plus de la moitié des valeurs du taux d'accrétion sont réparties dans les deux premières classes (de 1 à 11 g/m.h et de 11 à 21 g/m.h), soit de 1 à 21 g/m.h, pour le câble du faisceau

et pour le câble témoin. De plus, il n'y a plus de valeur de taux d'accrétion au-delà de 61 g/m.h sur le câble témoin. Sur le câble Bersimis, plus de la moitié des valeurs du taux d'accrétion sont réparties dans les trois premières classes (de 1 à 11 g/m.h, de 11 à 21 g/m.h et de 21 à 31 g/m.h), soit de 1 à 31 g/m.h. Sur le câble de garde, plus de la moitié des valeurs du taux d'accrétion sont réparties dans les trois classes (de 11 à 21 g/m.h, de 21 à 31 g/m.h et de 31 à 41 g/m.h), soit de 11 à 41 g/m.h. Il y a donc un décalage d'une classe entre le câble de garde et le câble Bersimis dès la première classe. Cette différence d'une classe réapparaît plus tard entre les classes de 61 à 101 g/m.h sur le câble Bersimis et entre les classes de 71 à 111 g/m.h sur le câble de garde.

VII-3. TRANSFORMATION DE LA GLACE SUR LE CÂBLE

La glace déposée sur le câble subit des transformations physiques (figures 47 à 49): elle se sublime, se condense, s'évapore, se liquéfie, fond en surface, recongèle en surface. De plus, une glace peut se transformer en un autre type de glace pour diverses raisons. Supposons que du verglas s'accumule sur un câble et qu'ensuite, pendant quelques jours, il n'y ait plus d'accumulation d'aucune sorte de glace, seulement la présence de nuages givrants. Dans ce cas là, il est clair que le dessus de la couche de verglas va se modifier au contact de l'air ambiant et se recouvrir de givre. La masse volumique de la glace va changer car elle est constituée d'un mélange de verglas et de givre qui peuvent se mélanger à l'interface verglas-givre. Malheureusement, nous ne sommes pas en mesure de déterminer avec précision la transformation d'une glace en un autre type de glace ou de mélange car cela met en jeu de nombreuses suppositions sur la métamorphose de la glace. De plus, les caractéristiques du dépôt de glace changent constamment avec le temps (Laflamme, 1998).

L'étude de la transformation de la glace semble donc hasardeuse et subjective. C'est pourquoi les transformations de glace ne seront pas considérées pendant la phase de maintien.

Cependant, il existe un cas plus évident de transformation de la glace: le givre et la pluie se transformant en verglas. S'il y a du givre au préalable sur le câble, l'eau de pluie se mélange au givre et leur combinaison produit du verglas. La masse du givre ajoutée à la masse d'eau de pluie est égale à la masse du verglas. Ceci est un cas plus plausible de transformation d'un type de glace en une nouvelle glace.

VII-4. IDENTIFICATION DE LA GLACE ET DES MÉLANGES PENDANT LA PHASE DE MAINTIEN

Il n'y a pas toujours de l'accrétion pendant la phase de maintien comme sa définition en témoigne. La difficulté majeure est d'identifier, sur les graphes de masse de glace, les types de glace présents au cours de la phase de maintien sous deux formes:

- En terme d'accrétion : dans ce cas là, la glace s'accumule sur le câble. Nous utilisons les critères d'identification définis au paragraphe VII-1 et les ordres de grandeur des taux décrits dans le paragraphe VII-3 pour identifier les types de glace pendant ces accrétions partielles.
- En terme de non-accrétion : dans ce cas, la glace reste sur le câble suivant une croissance ou décroissance lente du dépôt de glace ou encore un palier, ce qui correspond à une période d'endurance. Nous considérons que la glace est "en maintien" sur le câble. Nous notons le givre en maintien "GM", le verglas en maintien "VM", et la neige mouillée en maintien "NMM". Si cette glace est sous

cette forme pendant quelques jours, il est possible qu'elle subisse des transformations physiques et volumiques comme il est fait mention dans le paragraphe VII-3, mais nous n'en tenons pas compte pour les raisons énoncées au paragraphe VII-3. Un autre exemple de "non accrétion" est le cas où le dépôt de glace subit un délestage partiel.

Pour déterminer les différents types de glace présents pendant la phase de maintien, il faut considérer ce qui est visuellement observable sur les graphes de masse de glace, c'est à dire l'accrétion d'un type de glace et les périodes pendant lesquelles la glace est "en maintien". Par contre, nous ne concluons rien lors des délestages partiels. La succession de plusieurs types de glace accrétés ou en maintien constitue un mélange. Nous verrons dans ce qui suit qu'il peut y avoir plusieurs types de mélanges.

Remarquons qu'il peut se produire des accumulations de glace sur le câble qui n'apparaissent pas sur les graphes de charge de glace s'il s'est produit simultanément un délestage.

CHAPITRE VIII

PRÉSENTATION DE LA BASE DE DONNÉES

Ce chapitre présente la base de données que nous avons créée et que nous analyserons statistiquement aux chapitres IX et X.

VIII-1. SÉLECTION DES ÉVÉNEMENTS PERTINENTS

Dans notre étude, nous considérons les données des saisons de givrage de 1986-1987 à 1997-1998, soit un total de 12 saisons. Nous avons réalisé une étude préliminaire basée sur l'observation du signal de la masse de glace des événements de chaque saison et pour chaque type de câble. Pendant les saisons de 1986-1987 à 1989-1990, l'instabilité du signal ne permettait pas toujours de détecter avec certitude le début et la fin de la phase de maintien et donc la durée du maintien. Par ailleurs, les phases de maintien qui ont pu être identifiées avec certitude comportaient des interruptions du signal, ce qui nuisait à l'identification de la valeur de la charge maximale pendant la phase de maintien, la valeur de la charge minimale pendant la phase de maintien, le coefficient de variation de la charge de glace pendant la phase de maintien, ainsi que le type de glace ou mélange présent pendant la phase de maintien et le type de glace ou mélange associé à la charge maximale. Afin de minimiser l'incertitude due à l'instabilité des signaux ou à l'interruption des signaux, nous avons décidé de ne pas inclure ces données dans notre étude.

VIII-2. NOMBRE D'ÉVÉNEMENTS CONSIDÉRÉS

Le tableau 14 présente le nombre d'événements identifiés et considérés dans notre étude par type de câble et par saison, ainsi que le nombre total d'événements par type de câble.

Tableau 14 : Nombre d'événements par type de câble

	nombre d'événements			
	Bersimis	un câble du faisceau	garde	témoin
saison 90-91	3	3	3	3
saison 91-92	8	7	10	6
saison 92-93	8	10	8	10
saison 93-94	10	11	15	10
saison 94-95	9	9	10	6
saison 95-96	14	13	17	11
saison 96-97	12	12	13	11
saison 97-98	11	10	9	5
total	75	75	85	62

Dans l'ordre décroissant, le nombre d'événements identifiés est plus important sur le câble de garde (85 événements), puis sur le câble Bersimis et sur un câble du faisceau (75 événements), et sur le câble témoin (62 événements).

Dans les chapitres IX et X, nous analyserons des paramètres qui peuvent expliquer cette différence de nombre d'événements sur les quatre types de câble.

VIII-3. TYPES DE GLACE ET DE MÉLANGE IDENTIFIÉS

Les différents types de glace et de mélange doivent être distingués dans la base de données pour que l'analyse statistique soit significative. Le tableau 15 présente les types de glace et de mélange identifiés dans le cadre de notre étude en considérant toutes les saisons de givrage et en appliquant les critères d'identification énoncés au chapitre VII. Quatorze mélanges ont été identifiés : M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11, M12, M13 et M14.

Tableau 15 : Types de glace ou de mélange identifiés dans notre étude

	type de glace ou de mélange	code correspondant
type de glace	givre	G
	verglas	V
	neige mouillée	NM
type de mélange	V-G	M1
	V-G-V-G	M2
	G-V-G	M3
	G-V	M4
	V-G-V	M5
	NM-G-NM-G	M6
	G-V-G-V-G	M7
	G-V-G-V-G-V	M8
	V-G-V-G-V-G	M9
	V-G-V-G-V-G-V-G	M10
	G-V-G-V-G-V-G-V-G	M11
	G-V-G-V-G-V-G	M12
	V-G-V-G-V	M13
	G-V-G-V-G-V-G-V	M14

Comme il est fait mention dans le paragraphe VII-4 du chapitre précédent, nous avons identifié le givre en maintien "GM", le verglas en maintien "VM", et la neige mouillée en maintien "NMM" et avons ainsi obtenu, par exemple, des mélanges du type :

- GM-G-V-G-GM-G : mélange M3
- VM-V-G-GM-G-GM-V : mélange M5
- VM-V-G : mélange M1
- V-G-V-VM-V-G-GM-G : mélange M2
- G-GM-V-G-GM-G : mélange M3
- V-G-GM-V-G-V-G-V-G : mélange M10
- V-VM-V : verglas
- NMM: neige mouillée

Afin de limiter le nombre de mélanges identifiés, nous n'avons pas voulu inclure cette spécificité de glace en maintien car nous aurions obtenu plus de 30 mélanges. Nous avons préféré considérer le givre en maintien "GM" comme du givre, le verglas en maintien "VM" comme du verglas et la neige mouillée en maintien "NMM" comme de la neige mouillée. En conclusion, la codification des mélanges obtenus ne précise pas le maintien de la glace (VM, GM, NMM) mais tient compte de la succession des mélanges.

VIII-4. DÉFINITION DU COEFFICIENT DE VARIATION

Le coefficient de variation CV des n valeurs X_i d'une série est obtenu en divisant l'écart-type S par la moyenne arithmétique \bar{X} . Il est indépendant de l'unité de mesure de la variable considérée. Exprimé sous la forme d'un pourcentage, il s'écrit :

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100$$

$$\text{avec } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$

Le coefficient de variation est très utile car il permet d'apprécier la représentativité de la moyenne arithmétique par rapport à l'ensemble des données. En effet, \bar{X} sert à résumer l'ensemble des valeurs. La valeur de \bar{X} est d'autant plus exacte que les données ne sont pas trop dispersées autour de \bar{X} . La grandeur relative de S par rapport à \bar{X} permet d'apprécier cette représentativité. Le coefficient de variation donne ainsi une très bonne idée du degré d'homogénéité d'une distribution. Plus le coefficient de variation est faible, plus la série est homogène. Un coefficient de variation inférieur à 15 % semble être, dans bien des cas, une indication d'une bonne homogénéité de la distribution des données (Baillargeon, 1990).

VIII-5. IDENTIFICATION DES PHASES DE MAINTIEN

Les tableaux 16 à 18 présentent la base de données que nous avons élaborée à partir des fichiers “.XLW” des saisons de 1990-1991 à 1997-1998.

Le début et la fin de la phase de maintien de chaque événement ont été identifiés en appliquant les critères d'identification énoncés aux chapitres VI. Les types de glace ou de mélange ont été identifiés en appliquant les critères d'identification énoncés aux chapitres VII. Les autres paramètres ont été calculés sur Excel ou simplement observés.

Nous allons traiter statistiquement cette base de données afin de réaliser deux études : l'une sur les charges maximales, l'autre sur la phase de maintien.

CHAPITRE IX

ANALYSE STATISTIQUE DES CHARGES MAXIMALES

Ce chapitre présente la régression linéaire multiple réalisée sur la charge maximale de l'événement et l'analyse descriptive statistique des valeurs de charge maximale.

IX-1. RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE

IX-1-1. Équation de régression

La modélisation par régression linéaire consiste à déterminer une fonction analytique \hat{Y} (modèle) qui permette de rendre compte de la variation d'une variable Y (variable d'observation) en fonction d'une ou plusieurs variables X_1, X_2, \dots, X_m (variables de contrôle ou variables explicatives). Y est la variable dépendante, les variables X_j sont les variables indépendantes. Notons Y_i le point observé et \hat{Y}_i le point estimé. Une analyse de régression multiple permet de tester si l'ensemble des variables indépendantes a un effet significatif sur la variable dépendante. Dans tous les cas de modèle linéaire, le modèle de régression doit pouvoir s'écrire sous le type 0 ou 1 (Louchez, 1998) :

$$\text{Modèle de type (0)} : \hat{Y}_i = C_0 + C_1X_{i1} + C_2X_{i2} + C_jX_{ij} + \dots + C_{m-1}X_{i(m-1)}$$

$$\text{Modèle de type (1)} : \hat{Y}_i = C_1X_{i1} + C_2X_{i2} + C_jX_{ij} + \dots + C_mX_{im}$$

avec

$$1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m, n \gg m$$

Le modèle dépend de la détermination des coefficients $C_0, C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_{m-1}$.

Dans notre étude, notre but n'est pas de déterminer ces coefficients afin d'obtenir l'équation du modèle mais de déterminer l'influence de chacune des variables X_j sur la variable Y . Ceci revient à calculer le coefficient de détermination multiple noté R^2 qui permet de tester si l'ensemble des variables indépendantes a un effet significatif sur la variable dépendante.

Soit $SCR = \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2$, la variation expliquée par la régression.

$SCT = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2$, la variation totale ou somme totale corrigée des carrés.

$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$, la moyenne des Y_i .

Alors,

$$R^2 = \frac{SCR}{SCT} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

avec

$$0 \leq R^2 \leq 1$$

Le coefficient R^2 permet d'évaluer la proportion de la variation des Y_i autour de la moyenne \bar{Y} qui est expliquée par l'ensemble des variables explicatives retenues dans l'équation de régression (Baillargeon, 1989; Baillargeon, 1990). Plus R^2 est proche de 1, plus le modèle a réduit les écarts par rapport aux données (Louchez, 1998). En général, plusieurs calculs de régression sont nécessaires afin de déterminer le rôle de chaque terme du modèle.

Même si nous obtenons une valeur de R^2 élevée, l'écart-type des résidus peut être trop grand pour assurer des estimations avec une marge d'erreur acceptable. Ceci peut être le cas si la taille de l'échantillon est petite (Baillargeon, 1989). L'écart-type des résidus, noté S_r , est égal à :

$$S_r = \sqrt{CM_{res}} = \sqrt{\frac{SC_{res}}{n-m-1}}$$

avec

$$SC_{res} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2, \text{ la variation résiduelle ou somme des carrés des résidus.}$$

Le carré moyen résiduel CM_{res} est une estimation ponctuelle de la variance des Y_i autour du modèle de régression. Il est calculé dans le tableau d'analyse de variance obtenu lors de la régression multiple (Baillargeon et Rainville, 1975; Baillargeon, 1989). L'écart-type des résidus S_r donne une mesure de dispersion des Y_i autour de l'équation de régression multiple. Les unités associées à S_r sont celles de la variable dépendante Y .

Notons que $SCT = SCR + SC_{res}$.

IX-1-2. Variables de régression

Nous allons réaliser une analyse de régression sur la charge de glace maximale des événements de glace atmosphérique pendant la phase de maintien afin d'identifier le rôle des paramètres liés à la charge maximale.

La variable dépendante Y est la charge maximale de l'événement de glace atmosphérique. Les quatre variables indépendantes utilisées dans l'analyse de régression sont les suivantes :

X_1 : le type de glace ou de mélange correspondant à la charge maximale.

X_2 : la durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte.

X_3 : la charge de glace en fin de phase d'accrétion.

X_4 : le taux d'accrétion moyen pendant la phase d'accrétion.

Nous considérons donc le modèle :

$$\hat{Y} = C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 + C_4X_4 \quad (9.1)$$

La figure 50 présente l'événement 21 du câble de garde (tableau 17-3) et les paramètres Y , X_1 , X_2 , X_3 et X_4 de cet événement. Remarquons que si la charge maximale est la charge en fin de phase d'accrétion (en début de phase de maintien), alors X_2 a pour valeur 0.

IX-1-3. Présentation des données

IX-1-3-1. Fréquence des types de glace et de mélange par câble

Le tableau 19 présente, en nombre et en %, la fréquence des types de glace et de mélange présents sur chaque câble, du début de l'événement jusqu'à l'instant où la charge maximale est atteinte. Il s'agit donc du type de glace ou de mélange associé à la charge maximale de l'événement. Le calcul en % a été effectué à l'aide du nombre global d'événements par type de câble du tableau 14 du chapitre VIII.

Les types de glace et de mélange observés sont :

- givre,
- verglas,
- neige mouillée,
- M1 (V-G),
- M2 (V-G-V-G),
- M3 (G-V-G),
- M4 (G-V),
- M5 (V-G-V),
- M6 (NM-G-NM-G),
- M7 (G-V-G-V-G),
- M9 (V-G-V-G-V-G),
- M10 (V-G-V-G-V-G-V-G),
- M13 (V-G-V-G-V).

Sur le câble Bersimis, il n'y a pas de mélange M13 (V-G-V-G-V). Sur le câble du faisceau, il n'y a pas de mélange M10 (V-G-V-G-V-G-V-G). Sur le câble de garde, il n'y a pas de mélange M6 (NM-G-NM-G). Sur le câble témoin, il n'y a pas de mélanges M5 (V-G-V), M6 (NM-G-NM-G) et M10 (V-G-V-G-V-G-V-G). Nous remarquons qu'il n'y a pas de mélanges M8 (G-V-G-V-G-V), M11 (G-V-G-V-G-V-G-V-G) et M12 (G-V-G-V-G-V-G). Nous verrons dans le chapitre suivant que ces trois derniers mélanges sont présents pendant la phase de maintien.

Sur les quatre conducteurs, le givre est le type de glace le plus souvent observé et représente 30,67 % des cas sur le câble Bersimis, 34,67 % des cas sur le câble du faisceau, 35,29 % des cas sur le câble de garde et 35,48 % des cas sur le câble témoin. Le verglas est

le second type de glace le plus souvent observé après le givre : 25,33 % des cas sur le câble Bersimis, 22,67 % des cas sur le câble du faisceau, 21,18 % des cas sur le câble de garde et 22,58 % des cas sur le câble témoin. Les mélanges M1 (V-G) et M3 (G-V-G) sont les mélanges les plus souvent observés après le givre et le verglas.

Nous avons observé plus de cas de givre sur le câble du faisceau (34,67 %), sur le câble de garde (35,29 %) et le câble témoin (35,48 %) que sur le câble Bersimis (30,67 %) et inversement plus de cas de verglas sur le câble Bersimis (25,33 %) que sur le câble du faisceau (22,67 %), le câble de garde (21,18 %) et le câble témoin (22,58 %). De plus, le câble Bersimis dénombre plus de mélanges M3 (G-V-G) que les trois autres types de câbles et cette tendance est inversée avec le mélange M1 (V-G) par rapport aux trois autres types de câbles. Sur le câble de garde et le câble témoin qui sont les câbles de plus petit diamètre (tableau 1), nous avons identifié plus de mélanges M1 (V-G) que sur le câble Bersimis et sur le câble du faisceau.

Il y a très peu de mélanges M5 (V-G-V) et alors qu'il y a un nombre assez élevé de M3 (G-V-G). De même, il y a très peu de mélanges M4 (G-V) alors qu'il y a un nombre assez élevé de M1 (V-G).

Un seul cas de mélange M6 (NM-G-NM-G) a été identifié sur le câble Bersimis (événement 30 du tableau 16-1) et sur le câble du faisceau (événement 32 du tableau 16-2); ce dernier mélange est intéressant d'un point de vue atmosphérique. En effet, nous avons vu au chapitre VII que la neige mouillée se forme lorsque la température de l'air est supérieure ou égale à 0°C et que le givre se forme lorsque la température de l'air est négative. Le mélange M6 (NM-G-NM-G) s'est donc formé à température positive, puis négative, puis positive, puis négative sans que l'adhérence du mélange formé n'en soit affectée (paragraphe V-2. du chapitre V).

En conclusion, le givre et le verglas représentent 56 % des cas sur le câble Bersimis, 57 % sur le câble du faisceau, 56 % sur le câble de garde et 58 % sur le câble témoin. Les charges maximales de neige mouillée constituent un très faible échantillon de la population.

Dans notre étude, les valeurs de charge maximale de charge de glace sont celles des charges de glace faisant partie de la phase de maintien. Donc, nous ne disposons pas des charges maximales contenues dans des événements constitués d'une phase d'accrétion suivie directement d'une phase de délestage (sans phase de maintien), événements qui sont en principe des événements de verglas. Ceci diminue le nombre d'échantillons de charges maximales de type verglas.

IX-1-3-2. Distributions des variables de régression

Sur les figures 51 à 55, sont représentées, sous forme d'histogrammes de fréquence, pour les quatre types de conducteurs, les distributions de la charge maximale (Y; figure 51), du type de glace ou de mélange correspondant à la charge maximale (X_1 ; figure 52), de la durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte (X_2 ; figure 53), de la charge de glace en fin de phase d'accrétion (X_3 ; figure 54) et du taux d'accrétion moyen pendant la phase d'accrétion (X_4 ; figure 55).

Sur la figure 51, la largeur de classe est de 0,5 kg/m. Les classes des charges maximales (Y) les plus petites sont les plus fréquentes et les classes des charges maximales (Y) les plus élevées sont les moins fréquentes. Cette tendance est observable sur le câble Bersimis, le câble du faisceau et le câble témoin mais diffère sur le câble de garde en raison de sa fréquence plus élevée de charges maximales (Y) dans la classe de 1 à 1,5 kg/m. De plus, le câble de garde est le câble ayant les charges maximales (Y) les plus élevées, comprises dans la classe de 5,5 à 6 kg/m.

Sur la figure 52, la largeur de classe correspond au nombre de types de glace et de mélange (X_1) par type de câble (tableau 19), soit 12 classes sur le câble Bersimis, 12 classes sur le câble du faisceau, 12 classes sur le câble de garde et 10 classes sur le câble témoin. La figure 52 représente le tableau 19 du paragraphe IX-1-3-1 sous la forme de distributions.

Sur la figure 53, la largeur de classe est de 100 heures. Sur les quatre câbles, plus de 70 % des événements ont une durée (X_2) comprise entre 0 et 100 heures. Sur le câble Bersimis et le câble du faisceau, nous observons des durées (X_2) jusqu'à 1000 heures (41 jours). Sur le câble de garde, il n'y a pas de durées (X_2) au-delà de 800 heures (33 jours), et sur le câble témoin il n'y a pas de durées (X_2) au-delà de 700 heures (29 jours).

Sur la figure 54, la largeur de classe est de 0,25 kg/m. Comme sur la figure 51, les classes des charges (X_3) les plus petites sont les plus fréquentes et les classes des charges (X_3) les plus élevées sont les moins fréquentes. Le câble de garde est le câble ayant les charges en fin de phase d'accrétion (X_3) les plus élevées, comprises dans la classe de 2,25 à 2,5 kg/m.

Sur la figure 55, la largeur de classe est de 0,01 kg/m.h. Sur le câble Bersimis, le câble du faisceau et le câble témoin, les classes des taux d'accrétion (X_4) les plus petits sont les plus fréquentes et les classes des taux d'accrétion (X_4) les plus élevés sont les moins fréquentes. Sur le câble de garde, cette tendance est moins prononcée en raison de la première classe de 0 à 0,01 kg/m.h.

IX-1-3-3. Relations entre les variables de régression

Les figures 56 à 59 présentent les relations entre la charge maximale (Y) et les variables indépendantes (X_1 , X_2 , X_3 , X_4) utilisées dans l'analyse de régression, respectivement sur le câble Bersimis, le câble du faisceau, le câble de garde et le câble

témoin. Sur les figures 56.c, 57.c, 58.c et 59.c, la charge maximale augmente en même temps que la charge en fin de phase d'accrétion.

Les figures 60 à 63 présentent les relations mutuelles entre les variables indépendantes (X_1 , X_2 , X_3 , X_4) utilisées dans l'analyse de régression, respectivement sur le câble Bersimis, le câble du faisceau, le câble de garde et le câble témoin.

IX-1-4. Résultats

IX-1-4-1. Coefficients de corrélation

Le coefficient de corrélation est un nombre sans dimension compris entre -1 et +1 qui mesure l'intensité de la liaison linéaire entre deux variables observées. Les coefficients de corrélation entre la charge maximale (Y) et les variables de régression (X_1 , X_2 , X_3 , X_4) sont présentés dans les tableaux 20 à 23 pour chaque conducteur.

Tableau 20 : Coefficients de corrélation sur le câble Bersimis

	charge maximale	X_1	X_2	X_3	X_4
charge maximale	1	0,38	0,72	0,60	0,12
X_1	0,38	1	0,33	0,23	0,10
X_2	0,72	0,33	1	0,11	-0,03
X_3	0,60	0,23	0,11	1	0,27
X_4	0,12	0,10	-0,03	0,27	1

Tableau 21 : Coefficients de corrélation sur le câble du faisceau

	charge maximale	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
charge maximale	1	0,37	0,70	0,62	0,14
X ₁	0,37	1	0,28	0,19	0,08
X ₂	0,70	0,28	1	0,09	-0,01
X ₃	0,62	0,19	0,09	1	0,30
X ₄	0,14	0,08	-0,01	0,30	1

Tableau 22 : Coefficients de corrélation sur le câble de garde

	charge maximale	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
charge maximale	1	0,38	0,70	0,76	0,28
X ₁	0,38	1	0,32	0,26	0,17
X ₂	0,70	0,32	1	0,23	0,10
X ₃	0,76	0,26	0,23	1	0,33
X ₄	0,28	0,17	0,10	0,33	1

Tableau 23 : Coefficients de corrélation sur le câble témoin

	charge maximale	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄
charge maximale	1	0,22	0,68	0,69	0,19
X ₁	0,22	1	0,36	0,05	-0,03
X ₂	0,68	0,36	1	0,19	0,04
X ₃	0,69	0,05	0,19	1	0,34
X ₄	0,19	-0,03	0,04	0,34	1

Tableau 24 : Ordre décroissant des coefficients de corrélation avec
la charge maximale sur chaque type de conducteur

Bersimis	un câble du faisceau	garde	témoin
X ₂	X ₂	X ₃	X ₃
X ₃	X ₃	X ₂	X ₂
X ₁	X ₁	X ₁	X ₁
X ₄	X ₄	X ₄	X ₄

Sur le câble Bersimis et sur le câble du faisceau, les variables les plus corrélées à la charge maximale (Y) sont, dans l'ordre décroissant, X₂, X₃, X₁ et X₄. Sur le câble de garde et le câble témoin, les variables les plus corrélées à la charge maximale (Y) sont, dans l'ordre décroissant, X₃, X₂, X₁ et X₄.

Sur les quatre conducteurs, les variables X₂ (la durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte) et X₃ (la charge en fin de phase d'accrétion) sont les variables les plus corrélées à la charge maximale (Y). Le coefficient de corrélation entre X₂ et la charge maximale (Y) est égal à 0,72 sur le câble Bersimis, 0,70 sur le câble du faisceau, 0,70 sur le câble de garde et 0,68 sur le câble témoin. Le coefficient de corrélation entre X₃ et la charge maximale (Y) est égal à 0,60 sur le câble Bersimis, 0,62 sur le câble du faisceau, 0,76 sur le câble de garde et 0,69 sur le câble témoin. Le coefficient de corrélation entre X₁ (le type de glace ou de mélange correspondant à la charge maximale) et la charge maximale (Y) est égal à 0,38 sur le câble Bersimis, 0,37 sur le câble du faisceau, 0,38 sur le câble de garde et 0,22 sur le câble témoin. Le coefficient de corrélation entre X₄ (le taux d'accrétion moyen pendant la phase d'accrétion) et la charge maximale (Y) est égal à 0,12 sur le câble Bersimis, 0,14 sur le câble du faisceau, 0,28 sur le câble de garde et 0,19 sur le câble témoin. En conclusion, les

variables X_2 et X_3 présentent des corrélations significatives avec Y . Cependant, les corrélations des variables X_1 et X_4 avec Y sont insignifiantes.

Pour les quatre conducteurs, le coefficient de corrélation entre X_1 et X_2 est compris entre 0,28 et 0,36. Pour les quatre conducteurs, le coefficient de corrélation entre X_3 et X_4 est compris entre 0,27 et 0,34. Pour le câble Bersimis, le câble du faisceau et le câble de garde, le coefficient de corrélation entre X_1 et X_3 est compris entre 0,19 et 0,26; sur le câble témoin, il est égal à 0,05. Pour le câble de garde et le câble témoin, le coefficient de corrélation entre X_2 et X_3 est compris entre 0,19 et 0,23; pour le câble Bersimis et le câble du faisceau, il est compris entre 0,09 et 0,11. Pour les quatre conducteurs, le coefficient de corrélation entre X_1 et X_4 est inférieur ou égal à 0,17. Le coefficient de corrélation entre X_2 et X_4 est pratiquement nul pour le câble Bersimis, le câble du faisceau et le câble témoin; il est égal à 0,10 sur le câble de garde. En conclusion, il n'y a aucune corrélation significative entre les variables indépendantes X_1 , X_2 , X_3 et X_4 .

IX-1-4-2. Résultats de la régression

Les tableaux 25 à 28 présentent les résultats de la régression linéaire multiple, obtenus pour chaque câble en utilisant les commandes "Regression/Multiple" et la méthode "max. R-square" du logiciel WinSTAT 3.0, avec un niveau de confiance de 95 % :

Tableau 25 : Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale pour le câble Bersimis

nombre de variables	variables	coefficient R ² (%)
1	X ₂	51,80
2	X ₂ , X ₃	79,19
3	X ₂ , X ₃ , X ₁	79,34
4	X ₂ , X ₃ , X ₁ , X ₄	79,35

Pour le câble Bersimis, le coefficient de détermination R² est égal à 79,35 %.

79,19 % de la fluctuation des valeurs de la charge maximale (Y) autour de la moyenne $\bar{Y} = 0,828$ est expliquée par les deux variables X₂ et X₃ (X₂ : la durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte; X₃ : la charge de glace en fin de phase d'accrétion).

Tableau 26 : Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale pour le câble du faisceau

nombre de variables	variables	coefficient R ² (%)
1	X ₂	48,56
2	X ₂ , X ₃	79,36
3	X ₂ , X ₃ , X ₁	80,12
4	X ₂ , X ₃ , X ₁ , X ₄	80,22

Pour le câble du faisceau, le coefficient de détermination R² est égal à 80,22 %.

79,36 % de la fluctuation des valeurs de la charge maximale (Y) autour de la moyenne $\bar{Y} = 0,659$ est expliquée par les deux variables X₂ et X₃ (X₂ : la durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte; X₃ : la charge de glace en fin de phase d'accrétion).

Tableau 27 : Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale pour le câble de garde

nombre de variables	variables	coefficient R ² (%)
1	X ₃	57,91
2	X ₃ , X ₂	87,43
3	X ₃ , X ₂ , X ₁	87,55
4	X ₃ , X ₂ , X ₁ , X ₄	87,58

Pour le câble de garde, le coefficient de détermination R² est égal à 87,58 %.

87,43 % de la fluctuation des valeurs de la charge maximale (Y) autour de la moyenne $\bar{Y} = 0,861$ est expliquée par les deux variables X₃ et X₂ (X₃ : la charge de glace en fin de phase d'accrétion; X₂ : la durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte).

Tableau 28 : Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale pour le câble témoin

nombre de variables	variables	coefficient R ² (%)
1	X ₃	47,68
2	X ₃ , X ₂	79,02
3	X ₃ , X ₂ , X ₄	79,13
4	X ₃ , X ₂ , X ₄ , X ₁	79,15

Pour le câble témoin, le coefficient de détermination R² est égal à 79,15 %.

79,02 % de la fluctuation des valeurs de la charge maximale (Y) autour de la moyenne $\bar{Y} = 0,464$ est expliquée par les deux variables X₃ et X₂ (X₃ : la charge de glace en fin de phase d'accrétion; X₂ : la durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte).

Les modèles de régression expliquent la variation de la charge maximale (Y) à 79,35 %, 80,22 %, 87,58 % et 79,15 % respectivement sur le câble Bersimis, sur le câble du faisceau, sur le câble de garde et sur le câble témoin.

La durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte (X_2) est le facteur qui explique le mieux la variation de la charge maximale (Y) sur le câble Bersimis à 51,80 % et sur le câble du faisceau à 48,56 %. La charge de glace en fin de phase d'accrétion (X_3) est le deuxième facteur permettant d'augmenter le coefficient R^2 de 27,39 % sur le câble Bersimis et de 30,80 % sur le câble du faisceau. Remarquons ce qui a été énoncé au paragraphe IX-1-4-1 : sur le câble Bersimis et sur le câble du faisceau, les variables les plus corrélées à la charge maximale (Y) sont, dans l'ordre décroissant, X_2 et X_3 . Ces variables expliquent la variation de la charge maximale (Y) dans le même sens que leurs coefficients de corrélation.

La charge de glace en fin de phase d'accrétion (X_3) est le facteur qui explique le mieux la variation de la charge maximale (Y) sur le câble de garde à 57,91 % et sur le câble témoin à 47,68 %. Rappelons que ces deux câbles sont les câbles de plus petit diamètre (tableau 1). La durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte (X_2) est le deuxième facteur permettant d'augmenter le coefficient R^2 de 29,52 % sur le câble de garde et de 31,34 % sur le câble témoin.

Remarquons ce qui a été énoncé au paragraphe IX-1-4-1 : sur le câble de garde et le câble témoin, les variables les plus corrélées à la charge maximale (Y) sont, dans l'ordre décroissant, X_3 et X_2 . Ces variables expliquent la variation de la charge maximale (Y) dans le même sens que leurs coefficients de corrélation.

Le type de glace ou de mélange correspondant à la charge maximale (X_1) et le taux d'accrétion moyen pendant la phase d'accrétion (X_4) n'interviennent à peu près pas dans la

variation de la charge maximale (Y) car ils n'augmentent pas le coefficient R^2 de manière significative.

IX-1-4-3. Discussion

Il faut cependant se montrer prudent dans l'interprétation des résultats et vérifier si les variables X_3 (la charge de glace en fin de phase d'accrétion) et X_4 (le taux d'accrétion moyen pendant la phase d'accrétion) ne sont pas corrélées ou dépendantes de telle sorte que l'effet de la variable X_4 est contenu dans l'effet de la variable X_3 . Au paragraphe IX-1-4-1, nous avons vu que le coefficient de corrélation de X_3 et X_4 est égal à 0,27 sur le câble Bersimis, 0,30 sur le câble du faisceau, 0,33 sur le câble de garde et 0,34 sur le câble témoin. Nous allons vérifier la contribution de chaque variable explicative X_3 et X_4 dans l'explication de la charge maximale (Y). Il est nécessaire de calculer différents modèles pour examiner le rôle de différents termes (Louchez, 1998).

Nous allons donc effectuer deux nouvelles régressions en retranchant à tour de rôle la variable X_3 et la variable X_4 . Nous calculons de nouveau le coefficient R^2 en considérant les deux modèles suivants :

$$\hat{Y} = C_1X_1 + C_2X_2 + C_3X_3 \quad (9.2)$$

$$\hat{Y} = C_1X_1 + C_2X_2 + C_4X_4 \quad (9.3)$$

Avec

X_1 : le type de glace ou de mélange correspondant à la charge maximale.

X_2 : la durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte.

X_3 : la charge de glace en fin de phase d'accrétion.

X_4 : le taux d'accrétion moyen pendant la phase d'accrétion.

IX-1-4-4. Nouveaux calculs de régression

Les tableaux 29 à 32 présentent les résultats de la régression linéaire multiple, obtenus pour chaque câble en considérant le modèle de l'équation (9.2). Les tableaux 33 à 36 présentent les résultats de la régression linéaire multiple, obtenus pour chaque câble en considérant le modèle de l'équation (9.3).

Dans tous les calculs, nous avons utilisé les commandes "Regression/Multiple" et la méthode "max. R-square" du logiciel WinSTAT 3.0, avec un niveau de confiance de 95 %.

Tableau 29 : Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale en supprimant la variable X_4 pour le câble Bersimis

nombre de variables	variables	coefficient R^2 (%)
1	X_2	51,80
2	X_2, X_3	79,19
3	X_2, X_3, X_1	79,34

Tableau 30 : Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale en supprimant la variable X_4 pour le câble du faisceau

nombre de variables	variables	coefficient R^2 (%)
1	X_2	48,56
2	X_2, X_3	79,36
3	X_2, X_3, X_1	80,12

Tableau 31 : Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale en supprimant la variable X_4 pour le câble de garde

nombre de variables	variables	coefficient R^2 (%)
1	X_3	57,91
2	X_3, X_2	87,43
3	X_3, X_2, X_1	87,55

Tableau 32 : Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale en supprimant la variable X_4 pour le câble témoin

nombre de variables	variables	coefficient R^2 (%)
1	X_3	47,68
2	X_3, X_2	79,02
3	X_3, X_2, X_1	79,04

Dans le cas du modèle (9.2) qui supprime la variable X_4 , le coefficient R^2 est le même que dans le cas du modèle (9.1) pour le câble Bersimis (tableaux 25 et 29), le câble du faisceau (tableaux 26 et 30) et le câble de garde (tableaux 27 et 31). Sur le câble témoin, le coefficient R^2 est pratiquement le même que dans le cas du modèle (9.1) à 0,09 % près (tableaux 28 et 32). L'ajout de la variable X_4 à la suite des autres variables explicatives dans le modèle (9.1) n'apporte pas de contribution significative dans l'explication de la charge maximale (Y). Donc la variable X_4 est inutile.

Tableau 33 : Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale en supprimant la variable X_3 pour le câble Bersimis

nombre de variables	variables	coefficient R^2 (%)
1	X_2	51,80
2	X_2, X_1	53,89
3	X_2, X_1, X_4	55,52

Tableau 34 : Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale en supprimant la variable X_3 pour le câble du faisceau

nombre de variables	variables	coefficient R^2 (%)
1	X_2	48,56
2	X_2, X_1	51,77
3	X_2, X_1, X_4	53,35

Tableau 35 : Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale en supprimant la variable X_3 pour le câble de garde

nombre de variables	variables	coefficient R^2 (%)
1	X_2	49,34
2	X_2, X_4	54,07
3	X_2, X_4, X_1	55,80

Tableau 36 : Résultats de l'analyse de régression linéaire portant sur la charge maximale en supprimant la variable X_3 pour le câble témoin

nombre de variables	variables	coefficient R^2 (%)
1	X_2	46,72
2	X_2, X_4	49,26
3	X_2, X_4, X_1	49,30

Dans le cas du modèle (9.3) qui supprime la variable X_3 , le coefficient R^2 est plus faible que dans le cas du modèle (9.1) pour le câble Bersimis (tableaux 24 et 32), le câble du faisceau (tableaux 25 et 33), le câble de garde (tableaux 26 et 34) et le câble témoin (tableaux 27 et 35). Donc la variable X_3 est indispensable au modèle et est indépendante de la variable X_4 .

IX-1-4-5. Écart-type des résidus

L'écart-type des résidus S_r a été présenté au paragraphe IX-1-1. Le tableau 37 donne les résultats du calcul de S_r pour chaque type de câble.

Tableau 37 : Écart-type des résidus S_r en kg/m

	type de câble			
	Bersimis	un câble du faisceau	garde	témoin
S_r	0,447	0,309	0,364	0,227

L'écart-type des résidus est faible pour chacun des câbles, ce qui ne remet pas en cause la validité des résultats de R^2 .

IX-1-4-6. Conclusion des régressions

La variation de la charge maximale (Y) est expliquée par les variables X_2 (la durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte) et X_3 (la charge de glace en fin de phase d'accrétion) à 87,43 %, 79,36 %, 79,19 % et 79,02 % respectivement sur le câble de garde, le câble du faisceau, le câble Bersimis et le câble témoin. Le coefficient R^2 est proche de 100 %, ce qui signifie que le modèle (9.1) a considérablement réduit les écarts par rapport aux données (Louchez, 1998).

La régression a montré que le type de glace ou de mélange correspondant à la charge maximale (X_1) n'a pas d'influence sur la valeur de la charge maximale (Y).

La charge de glace en fin de phase d'accrétion (X_3) et le taux d'accrétion moyen pendant la phase d'accrétion (X_4) sont des variables indépendantes.

IX-2. DESCRIPTION STATISTIQUE DE LA CHARGE MAXIMALE

IX-2-1. Répartition par câble

Dans le tableau 38 sont présentées les valeurs maximales, minimales, moyennes et l'écart-type des valeurs de charge maximale (Y) pour chaque type de câble.

Tableau 38 : Répartition des valeurs de charge maximale par type de câble en kg/m
des saisons de 1990-1991 à 1997-1998

	type de câble			
	Bersimis	un câble du faisceau	garde	témoin
nombre de cas	75	75	85	62
maximum	4,751	3,295	5,740	2,619
minimum	0,094	0,076	0,097	0,078
moyenne	0,828	0,659	0,861	0,464
écart-type	0,957	0,677	1,009	0,480

Dans l'ordre décroissant, la moyenne et le maximum de la charge maximale (Y) sont plus élevés sur le câble de garde, sur le câble Bersimis, sur le câble du faisceau, et sur le câble témoin. Dans l'ordre décroissant, le minimum de la charge maximale (Y) est plus élevé sur le câble de garde, sur le câble Bersimis, sur le câble témoin et sur le câble du faisceau. La plus grande valeur des charges maximales (Y) est atteinte sur le câble de garde (5,740 kg/m). La plus petite valeur des charges maximales (Y) est atteinte sur le câble du faisceau (0,076 kg/m).

IX-2-2. Répartition par type de glace et de mélange

Dans le tableau 39 (en annexe) sont présentées les valeurs maximales, minimales, moyennes et l'écart-type des valeurs de charge maximale (Y), par type de glace et de mélange sur chaque câble. La fréquence des types de glace et des mélanges est donnée dans le tableau 19.

Sur le câble Bersimis, le maximum de la charge maximale (4,751 kg/m) est atteint pour un mélange de type M2 (V-G-V-G), ce qui correspond à l'événement 32 (tableaux 16-1 et 17-1). Sur le câble du faisceau, le maximum de la charge maximale (3,295 kg/m) est atteint pour un mélange de type M9 (V-G-V-G-V-G), ce qui correspond à l'événement 60 (tableaux 16-2 et 17-2). Sur le câble de garde, le maximum de la charge maximale (5,740 kg/m) est atteint pour un mélange de type M7 (G-V-G-V-G), ce qui correspond à l'événement 71 (tableaux 16-3 et 17-3). Sur le câble de garde, le maximum de la charge maximale (2,619 kg/m) est atteint pour un mélange de type M2 (V-G-V-G), ce qui correspond à l'événement 32 (tableaux 16-4 et 17-4).

En comparant, sur les quatre câbles, le maximum de la charge maximale (Y) obtenu par type de glace et de mélange, nous observons que le maximum de la charge maximale (Y) est atteint :

- sur le câble de garde pour le givre, les mélanges M1 (V-G), M4 (G-V), M7 (G-V-G-V-G) et M13 (V-G-V-G-V),
- sur le câble Bersimis pour le verglas, la neige mouillée, les mélanges M2 (V-G-V-G), M3 (G-V-G), M5 (V-G-V), M6 (NM-G-NM-G), M9 (V-G-V-G-V-G) et M10 (V-G-V-G-V-G-V-G).

En comparant, sur les quatre câbles, la moyenne des valeurs de charge maximale (Y) obtenue par type de glace et de mélange, nous observons que la moyenne de la charge maximale (Y) la plus élevée est atteinte :

- sur le câble du faisceau pour le givre,
- sur le câble Bersimis pour le verglas, la neige mouillée, les mélanges M1 (V-G), M2 (V-G-V-G), M6 (NM-G-NM-G), M9 (V-G-V-G-V-G), M10 (V-G-V-G-V-G-V-G),

- sur le câble de garde pour les mélanges M3 (G-V-G), M4 (G-V), M5 (V-G-V), M7 (G-V-G-V-G).

Sur le câble Bersimis, en comparant le minimum de la charge maximale (Y) entre les différents types de glace et de mélange, nous concluons que la plus petite valeur du minimum de la charge maximale (Y) est obtenue dans le cas du verglas (0,094 kg/m). Le résultat est identique sur le câble du faisceau (0,076 kg/m), sur le câble de garde (0,111 kg/m) et sur le câble témoin (0,078 kg/m). Ceci est peut-être lié au fait que les tempêtes de verglas pur sont très peu courantes au Mont-Valin. Elles se produisent aux mois d'octobre, novembre, avril et mai. Elles sont en général courtes et ont des charges maximales (Y) modérées.

Sur tous les câbles et pour tous les types de glace et de mélange, le maximum de la charge maximale (Y) est obtenu sur le câble Bersimis et sur le câble de garde. Sur tous les câbles et pour tous les types de glace et de mélange, le minimum de la charge maximale (Y) est obtenu sur le câble du faisceau et le témoin; nous ne considérons pas le cas du câble de garde (1,261 kg/m) car il ne représente qu'un événement de mélange M10 (voir tableau 19).

IX-2-3. Position de la charge maximale dans la phase de maintien

La figure 64 présente, sous forme d'histogramme de fréquence, la distribution de la position de la charge maximale (Y) dans la phase de maintien. Il y a trois classes : A, B, C. Le début du maintien est représenté par la classe A, le milieu du maintien par la classe B et la fin du maintien par la classe C. Le terme "milieu du maintien" signifie que la charge maximale (Y) se situe au sein de la phase de maintien, sans être exactement au milieu de celle-ci. Rappelons que la position A (début du maintien) correspond au cas où la charge

maximale (Y) est égale à la charge en fin de phase d'accrétion (X_3). Pour les quatre câbles, nous observons la même tendance : la charge maximale (Y) se situe le plus souvent, dans l'ordre décroissant, au milieu de la phase de maintien (position B), puis au début du maintien (position A) et en fin de phase de maintien (position C).

Nous remarquons une différence entre le câble témoin et les trois autres câbles. En effet, sur le câble témoin, il y a plus de cas de charges maximales (Y) se situant au milieu du maintien (position B) que sur les trois autres câbles.

Le tableau 40 présente, en nombre et en %, la fréquence de la position de la charge maximale (Y) dans la phase de maintien. Le calcul en % a été effectué à l'aide du nombre d'événements par type de câble du tableau 14 du chapitre VIII.

Tableau 40 : Position de la charge maximale dans la phase de maintien

		position de la charge maximale dans la phase de maintien		
		A (début)	B (milieu)	C (fin)
Bersimis	fréquence	29	36	10
	%	38,67	48	13,33
un câble du faisceau	fréquence	28	35	12
	%	37,33	46,67	16
garde	fréquence	30	38	17
	%	35,29	44,71	20
témoin	fréquence	18	36	8
	%	29,03	58,06	12,90

Ce tableau montre que la majorité des charges maximales (58,06 %) se situent au milieu de la phase de maintien sur le câble témoin alors que dans le cas du câble Bersimis,

du câble du faisceau et du câble témoin, moins de 49 % des cas se situent au milieu de la phase de maintien.

D'autre part, le câble de garde est le câble où nous observons le plus de charges maximales (Y) se situant en fin de phase de maintien.

IX-2-4. Prévion des valeurs de charge maximale

Au paragraphe IX-1-4-6, nous avons vu que la variation de la charge maximale (Y) est expliquée par les variables X_2 (la durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte) et X_3 (la charge de glace en fin de phase d'accrétion) sur les quatre types de câbles. Compte tenu de ces résultats, nous avons réalisé une analyse descriptive de ces trois variables, pour chaque type de câble, à partir de l'observation de notre base de données. Les résultats du paragraphe IX-1-4-6 ont montré que le type de glace ou de mélange correspondant à la charge maximale (X_1) n'a pas d'influence sur la valeur de la charge maximale (Y). Cependant, il est intéressant de regarder à quel type de glace ou de mélange correspondent les plus importantes valeurs de charge maximale (paragraphe III-5).

Les tableaux 41 à 44 (en annexe) présentent six classes de la charge maximale (Y) en fonction des valeurs minimales et maximales de X_3 et X_2 , et des types de glace et de mélange correspondant à la charge maximale (X_1). La largeur de classe de la charge maximale (Y) est 1 kg/m. L'objectif de ces tableaux est d'être en mesure de prévoir, pour chaque type de câble, la charge maximale (Y) d'un événement de glace atmosphérique à partir de la connaissance de X_3 , X_2 et du type de glace ou de mélange (paragraphe III-5).

Le câble de garde est le seul conducteur ayant une valeur de charge maximale (Y) dans la classe <5,000..5,999>, de valeur 5,740 kg/m, correspondant à un mélange M7 (G-V-G-V-G). Le câble Bersimis est le seul conducteur ayant des valeurs de charge maximale (Y) dans la classe <4,000..4,999>, pour des mélanges M2 (V-G-V-G) et M10 (V-G-V-G-V-G-V-G). Sur le câble du faisceau, il n'y a pas de valeur de charge maximale (Y) dans les classes <4,000..4,999> et <5,000..5,999> et il y a une unique valeur de charge maximale (Y) dans la classe <3,000..3,999>, correspondant à un mélange M9 (V-G-V-G-V-G).

Tous les conducteurs, à l'exception du câble témoin, ont des valeurs de charge maximale (Y) comprises dans la classe <3,000..3,999>, pour des mélanges M2 (V-G-V-G), M3 (G-V-G), M9 (V-G-V-G-V-G), M13 (V-G-V-G-V). Dans l'ordre décroissant, la fréquence relative de charges maximales (Y) la plus importante est sur le câble de garde (3,53 %), sur le câble Bersimis (2,67 %) et sur le câble du faisceau (1,34 %).

Tous les conducteurs ont des valeurs de charge maximale (Y) comprises dans les classes <0,000..0,999>, <1,000..1,999>, <2,000..2,999>. Dans l'ordre décroissant, sur tous les câbles, la fréquence relative de charges maximales (Y) la plus importante est dans la classe <0,000..0,999>, puis dans la classe <1,000..1,999>, et enfin dans la classe <2,000..2,999>. Comparativement au câble du faisceau et au câble témoin, le câble de garde et le câble Bersimis ont plus de valeurs de charge maximale (Y) comprises dans la classe <1,000..1,999> (24,71 % sur le câble de garde et 20 % sur le câble Bersimis) et moins dans la classe <0,000..0,999> (64,71 % sur le câble de garde et 72 % sur le câble Bersimis). La fréquence relative totale des valeurs de charge maximale (Y) pour les classes <0,000..0,999> et <1,000..1,999> est, dans l'ordre décroissant, plus élevée sur le câble témoin (total de 98,39 %), sur le câble du faisceau (total de 94,68 %), sur le câble Bersimis

(total de 92 %) et sur le câble de garde (totale de 89,42%). En conclusion, le câble de garde et le câble Bersimis ont des charges maximales (Y) plus élevées que sur le câble du faisceau et sur le câble témoin.

Le verglas est présent dans la classe <2,000..2,999>, uniquement sur le câble Bersimis. Le givre est présent dans la classe <2,000..2,999>, uniquement sur le câble de garde. Le givre et le verglas sont présents sur tous les câbles dans les classes <0,000..0,999> et <1,000..1,999>, à l'exception du câble témoin pour la classe <1,000..1,999>.

Sur le câble Bersimis et sur le câble du faisceau, il n'y pas de charge maximale (Y) égale à la charge en fin de phase d'accrétion (X_3) au-delà de la classe <1,000..1,999>. Sur le câble de garde, ce cas se produit dans la classe <2,000..2,999> à la différence du câble Bersimis et du câble du faisceau. Sur le câble témoin, ce cas se produit seulement dans la classe <0,000..0,999>.

IX-2-5. Coefficient de corrélation entre la charge maximale et la vitesse du vent

Dans le tableau 45, nous présentons les coefficients de corrélation entre la charge maximale (Y) et la vitesse du vent perpendiculaire au carré relative à la charge maximale pour les quatre types de câbles.

Tableau 45 : Coefficients de corrélation entre la charge maximale en kg/m et la vitesse du vent perpendiculaire au carré en km^2/h^2

	Bersimis	un câble du faisceau	garde	témoin
	charge maximale			
vitesse du vent perpendiculaire au carré	0,01	0,11	0,11	0,03

Les coefficients de corrélation sont très faibles. La figure 65 présente la relation entre la charge maximale (Y) et la vitesse du vent perpendiculaire au carré relative à la charge maximale pour les quatre types de câbles. La figure 65 confirme qu'il n'y a pas de corrélation entre les deux variables.

CHAPITRE X

ANALYSE DE LA PHASE DE MAINTIEN DE LA GLACE

X-1. INTRODUCTION

Rappelons la définition du “maintien de la glace” pendant la phase de maintien. Au chapitre III, nous avons défini la phase de maintien comme la phase comprise entre la phase d’accrétion et la phase de délestage. Au cours de cette phase, la glace reste “en maintien” sur le câble. La glace peut subir une ou plusieurs accrétions, un ou plusieurs délestages ou parfois aucun de ces états en se maintenant de manière constante sur le câble. Présentons quelques phénomènes observés pendant la phase de maintien de la glace :

- La température devient positive subitement ou bien il y a un pic de vent. Dans chacun des cas, nous avons un délestage important de la charge de glace.
- La glace se sublime sur le câble.
- Il peut y avoir plusieurs charges extrêmes pendant la phase de maintien.

La phase de maintien n’est pas toujours suivie d’une phase de délestage. Sur le tableau 18, nous constatons qu’il y a 5 événements sans phase de délestage sur le câble Bersimis, 8 sur le câble du faisceau, 5 sur le câble de garde et 3 sur le câble témoin.

X-2. TYPES DE GLACE ET DE MÉLANGE PENDANT LA PHASE DE MAINTIEN

X-2-1. Fréquence des types de glace et de mélange par câble

Le tableau 46 présente, en nombre et en %, la fréquence des types de glace et de mélange présents pendant la phase de maintien sur chaque câble. Le calcul en % a été effectué à l'aide du nombre global d'événements par type de câble du tableau 14 du chapitre VIII, soit 75 événements sur le câble Bersimis, 75 événements sur le câble du faisceau, 85 événements sur le câble de garde et 62 événements sur le câble témoin..

Les types de glace et de mélange observés sont :

- givre,
- verglas,
- neige mouillée,
- M1 (V-G),
- M3 (G-V-G),
- M4 (G-V),
- M5 (V-G-V),
- M7 (G-V-G-V-G),
- M8 (G-V-G-V-G-V),
- M11 (G-V-G-V-G-V-G-V-G),
- M12 (G-V-G-V-G-V-G),
- M14 (G-V-G-V-G-V-G-V).

Sur le câble Bersimis, il n'y a pas de mélange M14 (G-V-G-V-G-V-G-V). Sur le câble du faisceau, il n'y a pas de mélanges M11 (G-V-G-V-G-V-G-V-G) et M14 (G-V-G-V-G-V-G-V). Sur le câble de garde, il n'y a pas de mélange M8 (G-V-G-V-G-V). Sur le câble témoin, il n'y a pas de mélanges M11 (G-V-G-V-G-V-G-V-G) et M12 (G-V-G-V-G-V-G). Nous remarquons qu'il n'y a pas de mélanges M2 (V-G-V-G), M6 (NM-G-NM-G), M9 (V-G-V-G-V-G), M10 (V-G-V-G-V-G-V-G) et M13 (V-G-V-G-V). Ces cinq derniers mélanges ont été observés dans le chapitre précédent qui analysait les charges maximales.

Sur les quatre conducteurs, le givre est le type de glace le plus souvent observé et représente 41,33 % des cas sur le câble Bersimis, 41,33 % des cas sur le câble du faisceau, 49,41 % des cas sur le câble de garde et 48,39 % des cas sur le câble témoin. Le verglas est le second type de glace le plus souvent observé après le givre : 25,33 % des cas sur le câble Bersimis, 24 % des cas sur le câble du faisceau, 21,18 % des cas sur le câble de garde et 20,97 % des cas sur le câble témoin. Les mélanges M1 (V-G), M3 (G-V-G) et M4 (G-V) sont les mélanges les plus souvent observés après le givre et le verglas. Sur le câble Bersimis et sur le câble du faisceau, les cas les plus souvent observés après le verglas et le givre sont, dans l'ordre décroissant, M3 (G-V-G), puis en seconde position M1 (V-G) et M4 (G-V). Sur le câble de garde, les cas les plus souvent observés après le verglas et le givre sont, dans l'ordre décroissant, M3 (G-V-G) et M4 (G-V), puis M1 (V-G). Sur le câble témoin, les cas les plus souvent observés après le verglas et le givre sont, dans l'ordre décroissant, M3 (G-V-G), M1 (V-G) et M4 (G-V).

Nous avons observé plus de cas de givre sur le câble de garde et le câble témoin, câbles de plus petit diamètre (tableau 1), que sur le câble Bersimis et le câble du faisceau. C'est l'inverse dans le cas du verglas.

Il y a très peu de mélanges M5 (V-G-V) alors qu'il y a un nombre assez élevé de M3 (G-V-G). Le nombre de mélanges M4 (G-V) et M1 (V-G) est identique sur le câble Bersimis (6,67 %) et sur le câble du faisceau (8 %).

En conclusion, le givre et le verglas représentent 66 % des cas sur le câble Bersimis, 65 % sur le câble du faisceau, 70 % sur le câble de garde et 69 % sur le câble témoin. Un seul cas de neige mouillée a été observé sur chaque câble.

X-2-2. Distribution des types de glace et de mélange par câble

La figure 66 représente, sous la forme d'un histogramme de fréquence, la distribution du type de glace ou de mélange présents sur chaque type de câble pendant la phase de maintien. La largeur de classe correspond au nombre de types de glace et de mélange par type de câble (tableau 46), soit 11 classes sur le câble Bersimis, 11 classes sur le câble du faisceau, 11 classes sur le câble de garde et 10 classes sur le câble témoin.

La figure 66 représente le tableau 46 du paragraphe précédent sous la forme de distributions. Sur les quatre câbles, nous observons que le givre et le verglas sont majoritaires, avec une nette prédominance du givre sur le verglas. Il y a plus de cas de givre sur le câble de garde que sur les autres câbles car il y a plus d'événements de givre sur ce câble (tableau 14).

X-3. TEMPÉRATURE PENDANT LA PHASE DE MAINTIEN

X-3-1. Caractéristiques de la température par type de glace et de mélange

Le tableau 47 présente les caractéristiques de la température moyenne T_m mesurée sur chaque câble pendant la phase de maintien, par type de glace et de mélange.

Pour tous les câbles, la température moyenne (T_m) la plus élevée est observée dans le cas du verglas et de la neige mouillée. Le verglas se maintient pour des valeurs de T_m comprises entre $-3,7^{\circ}\text{C}$ et $-3,9^{\circ}\text{C}$, la neige mouillée pour des valeurs de T_m comprises entre $-0,5^{\circ}\text{C}$ et $0,1^{\circ}\text{C}$. Pour tous les câbles, la température moyenne (T_m) du givre en maintien est comprise entre $-11,1^{\circ}\text{C}$ et $-12,7^{\circ}\text{C}$. Dans les chapitres précédents, nous avons vu que le verglas se forme entre 0 et -3°C et le givre entre -3 et -25°C . Le tableau 47 confirme que le givre et le verglas en maintien se différencient à environ -3°C , comme dans leur condition de formation.

Dans le cas du verglas, la valeur de T_m minimale est comprise entre $-7,4^{\circ}\text{C}$ et $-8,8^{\circ}\text{C}$. Or, dans les chapitres précédents, nous avons vu que le verglas se forme entre 0 et -3°C . Dans notre étude, nous n'analysons pas la formation de verglas, mais son maintien au sens défini au chapitre III. Au cours de la phase de maintien, du verglas a pu se former à des températures comprises entre 0 et -3°C , voire parfois -5°C . Puis le verglas s'est maintenu à des températures inférieures à ces valeurs. Ceci explique pourquoi nous trouvons une T_m minimale de l'ordre de $-8,8^{\circ}\text{C}$.

Dans le cas du givre, la valeur de T_m maximale est comprise entre $-0,5^{\circ}\text{C}$ et $-1,9^{\circ}\text{C}$, valeurs proches de 0°C , mais négatives pour permettre le maintien du givre.

Pour tous les câbles, le mélange M5 (V-G-V) a des valeurs de T_m moyenne comprises entre -4°C et $-8,5^{\circ}\text{C}$, ce qui place ce mélange plus près des conditions de maintien du verglas que de celui du givre. Ce qui semble logique car ce mélange est principalement de type verglas. À l'inverse du mélange M5 (V-G-V), le mélange M3 (G-V-G) est principalement de type givre, ce qui explique que les valeurs de T_m moyenne soient comprises entre $-11,4^{\circ}\text{C}$ et $-15,1^{\circ}\text{C}$.

Les mélanges M1 (V-G) et M4 (G-V) représentent respectivement une portion raccourcie des mélanges M5 (V-G-V) et M3 (G-V-G). En comparant M4 (G-V) et M3 (G-

V-G), nous observons des valeurs de T_m maximale, T_m minimale et T_m moyenne plus basses dans le cas de M3 (G-V-G) que dans le cas de M4 (G-V). Ce résultat est logique car M3 (G-V-G) contient plus de givre en maintien que M4 (G-V), ce qui abaisse la température moyenne pendant la phase de maintien. En comparant M1 (V-G) et M5 (V-G-V), nous observons des valeurs de T_m minimale et T_m moyenne plus élevées dans le cas de M5 (V-G-V) que dans le cas de M1 (V-G), ce qui est logique car M5 (V-G-V) contient plus de verglas en maintien que M1 (V-G), ce qui élève la température moyenne pendant la phase de maintien.

Pour tous les câbles, le mélange M7 (G-V-G-V-G) a des valeurs de T_m moyenne comprises entre $-8,8^{\circ}\text{C}$ et $-16,4^{\circ}\text{C}$. Nous avons seulement identifié un mélange M8 (G-V-G-V-G-V), un mélange M11 (G-V-G-V-G-V-G-V-G), un mélange M12 (G-V-G-V-G-V-G) et un mélange M14 (G-V-G-V-G-V-G-V). Ces quatre derniers mélanges sont constitués d'une succession importante de givre et de verglas. Ces mélanges ont une T_m moyenne pendant la phase de maintien assez basse, entre $-12,1^{\circ}\text{C}$ et $-18,4^{\circ}\text{C}$. Nous verrons dans les paragraphes suivants si la température moyenne pendant la phase de maintien est liée à la durée de la phase de maintien.

X-3-2. Distribution de la température moyenne

La figure 67 représente, sous la forme d'un histogramme de fréquence, la distribution de la température moyenne pendant la phase de maintien sur chaque type de câble. La largeur de classe est de 2°C . Il y a au total 15 classes. Sur le câble Bersimis, les classes les plus fréquentes sont les quatre classes allant de -9°C à -1°C , sur le câble du faisceau et le câble de garde, les trois classes allant de -9°C à -3°C . Sur le câble témoin, les classes les plus fréquentes sont les deux classes de -9°C à -7°C et de -5°C à -3°C .

X-4. CHARGE DE GLACE ET VITESSE DU VENT

X-4-1. Charge de glace pendant la phase de maintien

X-4-1-1. Distribution de la charge de glace

Sur les figures 68 à 71, sont représentées, sous forme d'histogramme de fréquence, pour les quatre types de conducteurs, les distributions du coefficient de variation de la charge de glace pendant la phase de maintien (figure 68), de la moyenne de la charge de glace pendant la phase de maintien (figure 69), de la médiane de la charge de glace pendant la phase de maintien (figure 70) et de la charge de glace minimale pendant la phase de maintien (figure 71).

Le coefficient de variation de la charge de glace pendant la phase de maintien a été calculé sur la distribution des valeurs de charge de glace enregistrées pendant la phase de maintien toutes les 30 minutes (voir paragraphe II-2.). Le coefficient de variation de la charge de glace pendant la phase de maintien a été calculé pour chaque événement, sur chacun des câbles (tableaux 17-1, 17-2, 17-3 et 17-4). La figure 68 présente la distribution du coefficient de variation de la charge de glace pendant la phase de maintien pour 75 événements sur le câble Bersimis, 75 événements sur le câble du faisceau, 85 événements sur le câble de garde et 62 événements sur le câble témoin. Tel que mentionné au paragraphe VIII-4, plus le coefficient de variation est faible, plus la série est homogène. Un coefficient de variation inférieur à 15 % semble être, dans bien des cas, une indication d'une bonne homogénéité de la distribution des données (Baillargeon, 1990). Sur la figure 68, la largeur de classe est de 15 %. Plus du tiers des valeurs du coefficient de variation sont réparties dans la plus petite classe, de 0 à 15 %. Donc, 33 % des événements du câble Bersimis ont une distribution de la charge de glace homogène pendant la phase de maintien, contre 37,5 % sur le câble du faisceau, 38 % sur le câble de garde et 39 % sur le câble

témoin. Plus le coefficient de variation augmente, moins il y a de cas dans les classes. Le câble de garde est le câble ayant une proportion plus importante de cas dans la classe de 15 à 30 %, comparativement aux autres câbles.

Sur la figure 69, la largeur de classe est de 0,25 kg/m. Nous observons plus de 65 % des événements ayant la moyenne de la charge de glace comprise entre 0 et 0,5 kg/m sur le câble de garde et le câble Bersimis, 70 % sur le câble du faisceau et 80 % sur le câble témoin. Seuls le câble de garde et le câble Bersimis présentent des moyennes de charge de glace au-delà de 2 kg/m.

Sur la figure 70, la largeur de classe est de 0,25 kg/m. Contrairement à la moyenne qui est considérée comme une moyenne de grandeur, la médiane est plutôt considérée comme une moyenne de position. La médiane, notée Me , est la valeur (observée ou possible) de la variable statistique, dans la série de données ordonnée en ordre croissant ou décroissant, qui partage cette série en deux parties, chacune comprenant le même nombre de données de part et d'autre de Me (Baillargeon, 1990). La figure 70 est quasiment identique à la figure 69.

Sur la figure 71, la largeur de classe est de 0,125 kg/m. Seuls le câble de garde et le câble Bersimis présentent des valeurs de charge de glace minimale au-delà de 1 kg/m pendant la phase de maintien.

X-4-1-2. Coefficient de variation par type de glace et de mélange

Le tableau 48 présente les caractéristiques du coefficient de variation pendant la phase de maintien, par type de glace et de mélange. Ce paragraphe présente des ordres de grandeur du coefficient de variation par type de glace et de mélange à la différence du paragraphe précédent qui présentait le coefficient de variation de façon globale, c'est-à-dire

pour tous les événements de chacun des câbles. Les types de glace et de mélange ont été définis au tableau 46 (paragraphe X-2-1). Ainsi, sur le câble Bersimis et sur le câble du faisceau, 11 types de glace et de mélange ont été identifiés sur 75 événements. Sur le câble de garde, 11 types de glace et de mélange ont été identifiés sur 85 événements. Sur le câble témoin, 10 types de glace et de mélange ont été identifiés sur 62 événements. Le maximum et le minimum du tableau 48 correspondent respectivement au maximum et au minimum du coefficient de variation observé par type de glace et de mélange. La moyenne du tableau 48 correspond à la moyenne du coefficient de variation calculée par type de glace et de mélange. L'objectif de ce tableau est de donner des ordres de grandeur sur l'homogénéité de la distribution de la charge de glace par type de glace et de mélange.

Sur les quatre câbles, la valeur moyenne du coefficient de variation est comprise entre 19 et 22 % dans le cas du givre et entre 15 et 25 % dans le cas du verglas. En se basant sur le maximum et la moyenne du coefficient de variation, la distribution de la charge de glace est plus homogène dans le cas du givre que dans le cas du verglas. Ceci est justifié par le fait que le verglas se forme de manière très rapide, puis se déleste brutalement, ce qui est à l'origine de fluctuations importantes de la charge de glace sur le câble.

Dans tout le tableau, le coefficient de variation maximum est observé pour du verglas (114 % sur le câble Bersimis, 144 % sur le câble du faisceau, 105 % sur le câble de garde), puis pour du givre (93 % sur le câble Bersimis, 89 % sur le câble du faisceau).

Le seul cas de neige mouillée en maintien que nous avons identifié indique une très bonne homogénéité de la charge de glace, avec un coefficient de variation compris entre 1 et 8.

Les mélanges M1 (V-G), M3 (G-V-G), M4 (G-V), M5 (V-G-V), M7 (G-V-G-V-G), M8 (G-V-G-V-G-V), M11 (G-V-G-V-G-V-G-V-G), M12 (G-V-G-V-G-V-G) et M14 (G-V-G-V-G-V-G-V) ont tous une valeur moyenne du coefficient de variation supérieure à

15 % sauf dans le cas du mélange M5 (V-G-V) sur le câble de garde. De tous les mélanges, les mélanges M4 (G-V) et M5 (V-G-V) ont la plus petite valeur minimale du coefficient de variation.

X-4-2. Vitesse moyenne et maximale du vent pendant la phase de maintien

X-4-2-1. Distribution de la vitesse moyenne

La figure 72 représente la distribution de la vitesse moyenne du vent perpendiculaire pendant la phase de maintien. La largeur de classe est de 5 km/h. Cette distribution est proche de l'allure d'une distribution de loi normale. Pour les quatre câbles, la classe comprenant le plus de cas est la classe de 15 à 20 km/h.

X-4-2-2. Distribution de la vitesse maximale

La figure 73 représente la distribution de la vitesse maximale du vent perpendiculaire pendant la phase de maintien. La largeur de classe est de 5 km/h. Un vent d'amplitude supérieure à 70 km/h et inférieure à 75 km/h a été observé pendant la phase de maintien, sur chacun des câbles. La classe comprenant le plus de cas est la classe de 25 à 30 km/h sur le câble Bersimis et le câble du faisceau, la classe de 30 à 35 km/h sur le câble de garde et les deux classes de 25 à 35 km/h sur le câble témoin.

X-4-3. Charge de glace et vitesse du vent

X-4-3-1. Coefficient de corrélation

Dans le tableau 49, nous présentons les coefficients de corrélation entre le coefficient de variation de la charge de glace et la vitesse moyenne du vent perpendiculaire pendant la phase de maintien.

Tableau 49 : Coefficients de corrélation entre le coefficient de variation de la charge de glace et la vitesse moyenne du vent perpendiculaire en km/h et en km²/h²

	Bersimis	un câble du faisceau	garde	témoin
	coefficient de variation de la charge de glace			
vitesse moyenne du vent perpendiculaire pendant la phase de maintien	0,14	0,06	0,19	0,08
vitesse moyenne au carré du vent perpendiculaire pendant la phase de maintien	0,06	-0,01	0,12	-0,01

Les coefficients de corrélation sont très faibles. Ce résultat n'indique aucun lien entre l'effet du vent et la variation de la charge de glace pendant la phase de maintien.

X-4-3-2. Relation entre la charge de glace et la vitesse du vent au carré

La figure 74 présente la relation entre le coefficient de variation de la charge de glace et la vitesse moyenne au carré du vent perpendiculaire pour les quatre types de câble. Cette figure confirme qu'il n'y a pas de corrélation entre les deux variables.

X-5. DURÉE DE LA PHASE DE MAINTIEN

X-5-1. Caractéristiques de la durée de la phase de maintien par type de glace et de mélange

Le tableau 50 présente les caractéristiques de la durée de la phase de maintien, par type de glace et de mélange et par câble. La phase de maintien peut durer de quelques heures à quelques mois. En effet, la phase de maintien a duré 1,5 heures sur le câble du faisceau

(événement 51 du tableau 16-2) et 2671,5 heures sur ce même câble (événement 60 du tableau 16-2), soit plus de trois mois.

L'événement 59 du tableau 16-1 est l'événement ayant la plus longue phase de maintien (2670,5 heures) sur le câble Bersimis, correspondant au mélange M11 (G-V-G-V-G-V-G-V-G). L'événement 60 du tableau 16-2 est l'événement ayant la plus longue phase de maintien (2671,5 heures) sur le câble du faisceau, correspondant au mélange M12 (G-V-G-V-G-V-G). L'événement 71 du tableau 16-3 est l'événement ayant la plus longue phase de maintien (2322,5 heures) sur le câble de garde, correspondant au mélange M11 (G-V-G-V-G-V-G-V-G). L'événement 54 du tableau 16-4 est l'événement ayant la plus longue phase de maintien (1564 heures) sur le câble témoin, correspondant au mélange M7 (G-V-G-V-G).

L'événement 74 du tableau 16-1 est l'événement ayant la plus courte phase de maintien (4 heures) sur le câble Bersimis, correspondant à du verglas. L'événement 51 du tableau 16-2 est l'événement ayant la plus courte phase de maintien (1,5 heures) sur le câble du faisceau, correspondant à du givre. L'événement 62 du tableau 16-3 est l'événement ayant la plus courte phase de maintien (2 heures) sur le câble de garde, correspondant à du givre. L'événement 41 du tableau 16-4 est l'événement ayant la plus courte phase de maintien (2 heures) sur le câble témoin, correspondant à du givre.

En général, les phases de maintien les plus longues se produisent lorsque la température reste négative pendant de longs mois (de décembre à mars), les plus courtes en début et en fin de saison (octobre, avril et mai).

Dans le cas du givre, du verglas, de la neige mouillée et des mélanges M4 (G-V), M5 (V-G-V), M7 (G-V-G-V-G), la durée moyenne de la phase de maintien est plus longue sur

le câble Bersimis et sur le câble du faisceau que sur le câble de garde. Le givre, le verglas, la neige mouillée et les mélanges M4 (G-V), M5 (V-G-V), M7 (G-V-G-V-G) représentent au total 80 % des cas sur le câble Bersimis, 78 % des cas sur le câble du faisceau et 82 % sur le câble de garde. Donc, pour environ 80 % des événements, la durée moyenne de la phase de maintien est plus longue sur le câble Bersimis et sur le câble du faisceau que sur le câble de garde.

Dans le cas du givre, du verglas et de la neige mouillée, la durée moyenne la plus élevée sur les quatre câbles est obtenue, dans l'ordre décroissant, pour du givre, du verglas et de la neige mouillée. Dans le cas du givre, la durée moyenne la plus élevée a été obtenue, dans l'ordre décroissant, sur le câble Bersimis, sur le câble témoin, sur le câble du faisceau et sur le câble de garde. Dans le cas du verglas, la durée moyenne la plus élevée a été obtenue, dans l'ordre décroissant, sur le câble du faisceau, sur le câble Bersimis, sur le câble de garde et sur le câble témoin.

Sur tous les câbles, parmi les mélanges M1 (V-G), M3 (G-V-G), M4 (G-V) et M7 (G-V-G-V-G), le mélange M4 (G-V) est le mélange ayant la plus petite durée moyenne. Sur le câble du faisceau, le câble de garde et le câble témoin, la durée minimale a été observée pour du givre et non du verglas.

À partir de l'avant-dernière ligne du tableau 50, nous concluons que la durée maximale est atteinte :

- sur le câble Bersimis pour M4 (G-V), M5 (V-G-V) et M11 (G-V-G-V-G-V-G-V-G),
- sur le câble du faisceau pour du givre, du verglas, de la neige mouillée, M3 (G-V-G) et M12 (G-V-G-V-G-V-G),
- sur le câble de garde pour M14 (G-V-G-V-G-V-G-V),

- sur le câble témoin pour M1 (V-G), M7 (G-V-G-V-G) et M8 (G-V-G-V-G-V).

Par conséquent, le câble du faisceau est le câble sur lequel le givre, le verglas et la neige mouillée “restent en maintien” le plus longtemps pendant la phase de maintien.

À partir de la dernière ligne du tableau 50, nous concluons que la durée minimale est atteinte :

- sur le câble Bersimis pour M8 (G-V-G-V-G-V) et M12 (G-V-G-V-G-V-G),
- sur le câble du faisceau pour du givre, M1 (V-G), M3 (G-V-G), M4 (G-V), M5 (V-G-V) et M7 (G-V-G-V-G),
- sur le câble de garde pour M11 (G-V-G-V-G-V-G-V-G),
- sur le câble témoin pour du verglas, de la neige mouillée et M14 (G-V-G-V-G-V-G-V).

Sur le câble Bersimis, la durée maximale de la phase de maintien la plus longue a été observée, dans l'ordre décroissant, pour les mélanges et types de glace suivants :

- M11 (G-V-G-V-G-V-G-V-G),
- M12 (G-V-G-V-G-V-G),
- M1 (V-G),
- M7 (G-V-G-V-G),
- M3(G-V-G),
- M5 (V-G-V),
- givre,
- M8 (G-V-G-V-G-V),
- M4 (G-V),

- verglas,
- neige mouillée.

Sur le câble du faisceau, la durée maximale de la phase de maintien la plus longue a été observée, dans l'ordre décroissant, pour les mélanges et types de glace suivants :

- M12 (G-V-G-V-G-V-G),
- M3 (G-V-G),
- M1 (V-G),
- M5 (V-G-V),
- givre,
- M8 (G-V-G-V-G-V),
- M4 (G-V),
- M7 (G-V-G-V-G),
- verglas,
- neige mouillée.

Sur le câble de garde, la durée maximale de la phase de maintien la plus longue a été observée, dans l'ordre décroissant, pour les mélanges et types de glace suivants :

- M11 (G-V-G-V-G-V-G-V-G),
- M12 (G-V-G-V-G-V-G),
- M1 (V-G),
- M3 (G-V-G),
- givre,
- M14 (G-V-G-V-G-V-G-V),
- M7 (G-V-G-V-G),

- M4 (G-V),
- verglas,
- M5 (V-G-V),
- neige mouillée.

Sur le câble témoin, la durée maximale de la phase de maintien la plus longue a été observée, dans l'ordre décroissant, pour les mélanges et types de glace suivants :

- M7 (G-V-G-V-G),
- M1 (V-G),
- M8 (G-V-G-V-G-V),
- M5 (V-G-V),
- M3 (G-V-G),
- M14 (G-V-G-V-G-V-G-V),
- givre,
- M4 (G-V),
- verglas,
- neige mouillée.

En conclusion, la phase de maintien peut durer de quelques heures à quelques mois. La plus longue phase de maintien a duré plus de trois mois. Pour environ 80 % des événements, la durée moyenne de la phase de maintien est plus longue sur le câble Bersimis et sur le câble du faisceau que sur le câble de garde. Dans le cas du givre, du verglas et de la neige mouillée, la durée moyenne de la phase de maintien la plus élevée sur les quatre câbles est obtenue, dans l'ordre décroissant, pour du givre, du verglas et de la neige mouillée. Les types de glace ou de mélange qui se maintiennent le plus longtemps

pendant la phase de maintien sont M11 (G-V-G-V-G-V-G-V-G) et M12 (G-V-G-V-G-V-G-V-G) sur le câble Bersimis et sur le câble de garde, M12 (G-V-G-V-G-V-G) sur le câble du faisceau, M1 (V-G) et M7 (G-V-G-V-G) sur le câble témoin.

X-5-2. Distribution de la durée de la phase de maintien

La figure 75 présente la distribution de la durée de la phase de maintien. La largeur de classe est de 200 heures. Cette distribution est proche de l'allure d'une distribution de loi log-normale car la première classe de 0 à 200 heures contient plus de 65 % des cas.

X-5-3. Coefficient de corrélation entre la durée et les variables

Le tableau 51 présente le coefficient de corrélation entre la durée de la phase de maintien et le type de glace ou de mélange présent pendant la phase de maintien, la température pendant la phase de maintien (en °C), le coefficient de variation de la charge de glace pendant la phase de maintien (en %), la vitesse moyenne du vent perpendiculaire pendant la phase de maintien (en km/h) et la vitesse moyenne au carré du vent perpendiculaire (en km²/h²).

Tableau 51 : Coefficients de corrélation entre la durée de la phase de maintien et les variables pendant la phase de maintien

	Bersimis	un câble du faisceau	garde	témoin
	durée de la phase de maintien			
type de glace ou mélange	0,59	0,47	0,55	0,49
température moyenne	-0,46	-0,44	-0,39	-0,41
coefficient de variation de la charge de glace	0,55	0,47	0,53	0,78
vitesse moyenne du vent perpendiculaire	0,08	0,06	0,08	0,07
vitesse moyenne au carré du vent perpendiculaire	0,01	-0,01	0,01	-0,02

La durée de la phase de maintien et la température moyenne pendant la phase de maintien sont inversement corrélés et de manière importante. Ce résultat semble à priori logique car plus la température est négative, plus la durée aura tendance à être longue. En effet, la glace se maintient tant que la température ne devient pas positive.

La durée de la phase de maintien et le coefficient de variation de la charge de glace pendant la phase de maintien sont positivement corrélés et de manière importante. Mais ce résultat est difficile à interpréter car il implique une relation de cause à effet. Or, ces deux variables peuvent être mutuellement causées par l'une ou par l'autre. Considérons que la durée est la cause. Plus la durée est longue, plus la charge de glace aura tendance à fluctuer, ce qui entraîne un coefficient de variation élevé. Inversement, moins la durée est longue, moins la charge de glace aura tendance à fluctuer, ce qui entraîne un coefficient de variation plus faible. Ceci pourrait expliquer la forte corrélation positive entre la durée et le coefficient de variation pendant la phase de maintien. Considérons que le coefficient de

variation de la charge de glace est la cause. Plus le coefficient de variation est élevé, plus le câble subit des fluctuations de charge de glace et cela entraîne une durée plus ou moins longue. Le coefficient de corrélation est plus élevé sur le câble témoin que sur les autres câbles, avec une valeur de 0,78.

Les coefficients de corrélation sont très faibles entre la durée de la phase de maintien et la vitesse moyenne du vent perpendiculaire, de même que pour la vitesse moyenne au carré du vent perpendiculaire. Notons que la vitesse moyenne pendant la phase de maintien n'est pas toujours significative car il peut s'agir d'une moyenne de vent établie pendant un ou plusieurs mois, lorsque la phase de maintien est très longue.

La durée de la phase de maintien et le type de glace ou de mélange sont positivement corrélés et de manière importante. Nous avons vu précédemment que la durée de la phase de maintien et la température moyenne pendant la phase de maintien sont très corrélées. Donc le type de glace ou de mélange et la température moyenne sont tous deux très corrélés à la durée. Regardons si ces deux variables sont corrélées entre elles à l'aide du tableau 52. Le coefficient de corrélation entre ces deux variables est très faible.

Tableau 52 : Coefficient de corrélation entre le type de glace ou de mélange et la température moyenne pendant la phase de maintien en h

	Bersimis	un câble du faisceau	garde	témoin
	type de glace ou de mélange pendant la phase de maintien			
température moyenne pendant la phase de maintien	-0,03	0,12	0,09	0,06

X-5-4. Relations entre la durée et les variables

Les figures 76 à 80 présentent la relation entre la durée de la phase de maintien et le type de glace ou de mélange pendant la phase de maintien, la température moyenne pendant la phase de maintien, le coefficient de variation de la charge de glace pendant la phase de maintien, la vitesse moyenne au carré du vent perpendiculaire pendant la phase de maintien et la durée de la phase d'accrétion.

La figure 76 montre que les types de glace ou de mélange qui se maintiennent le plus longtemps sont M11 (G-V-G-V-G-V-G-V-G) et M12 (G-V-G-V-G-V-G) sur le câble Bersimis et sur le câble de garde, M12 (G-V-G-V-G-V-G) sur le câble du faisceau, M1 (V-G) et M7 (G-V-G-V-G) sur le câble témoin.

La figure 77 montre qu'il n'y pas de relation entre la durée de la phase de maintien et la température moyenne pendant la phase de maintien bien que le coefficient de corrélation entre ces deux variables ait été dit important au paragraphe X-5-3 (voir tableau 51). Sur tous les câbles, toutes les durées les plus importantes se produisent pour des températures moyennes pendant la phase de maintien comprises entre -11°C et -19°C . Sur le câble Bersimis et le câble du faisceau, nous observons un cas particulier : une phase de maintien a duré environ 1200 heures (50 jours) avec une température moyenne de -24°C .

Sur la figure 78, la durée de la phase de maintien augmente en même temps que le coefficient de variation de la charge de glace pendant la phase de maintien. Nous pouvons tracer une droite linéaire partant de l'origine sur les figures 78.a, 78.b, 78.c et 78.d. Dans le cas du câble de garde (figure 78.c), la pente de la droite est plus faible que pour les autres câbles. Par ailleurs, le tableau 51 du paragraphe X-5-3 a montré une forte corrélation entre

la durée et le coefficient de variation. Il y a donc un lien évident entre la durée de la phase de maintien et le coefficient de variation de la charge de glace pendant la phase de maintien. Comme il a été mentionné au chapitre VIII (paragraphe VIII-4), un coefficient de variation inférieur à 15 % semble être, dans bien des cas, une indication d'une bonne homogénéité de la distribution des données. La figure 78 montre qu'une bonne homogénéité du coefficient de variation n'influence pas la durée du maintien. En effet, la durée n'est pas longue lorsque le coefficient de variation est compris entre 0 et 15 %, mais elle le devient lorsque le coefficient de variation est compris entre 30 et 75 % sur le câble Bersimis et sur le câble du faisceau, entre 45 et 75 % sur le câble de garde et entre 25 et 80 % sur le câble témoin.

Le tableau 51 du paragraphe X-5-3 a donné un coefficient de corrélation très faible entre la durée de la phase de maintien et la vitesse moyenne au carré du vent perpendiculaire. La figure 79 confirme qu'il n'y a pas de relation entre ces deux variables.

La figure 80 ne permet pas de conclure à un lien direct entre la durée de la phase d'accrétion et la durée de la phase de maintien.

X-6. DÉLESTAGES PENDANT LA PHASE DE MAINTIEN

Pendant la phase de maintien, le câble subit de nombreux délestages, de plus ou moins grande amplitude. Dans le tableau 53, nous présentons les plus importants délestages que nous avons observés sur le câble Bersimis, le câble du faisceau, le câble de garde et le câble

témoin, pendant les saisons de 1989-1990 à 1997-1998. La charge initiale avant le délestage est notée W_i , la charge finale après le délestage est notée W_f .

Dans l'ordre décroissant, les taux de délestage maximum sont plus importants sur le câble de garde, sur le câble Bersimis, sur le câble du faisceau et sur le câble témoin.

Dans l'ordre décroissant, les pourcentages de glace délestée ($(W_i - W_f) / W_i$) maximum sont plus importants sur le câble de garde, sur le câble du faisceau, sur le câble Bersimis et sur le câble témoin.

Sur les quatre câbles, nous observons des cas où le délestage s'est produit juste après l'apparition de la charge maximale de l'événement, ce qui correspond à " $W_i =$ charge maximale". La presque totalité des délestages faisant suite à une charge maximale ont des valeurs de taux de délestage et de pourcentages de glace délestée d'un ordre de grandeur très élevé, correspondant aux plus importantes valeurs du tableau.

Au chapitre III, nous avons vu que les délestages pendant la phase de maintien ne se produisent pas toujours en même temps sur les conducteurs d'une même ligne. Ce phénomène entraîne un déséquilibre de la répartition de la charge de glace sur la ligne, dans notre cas, sur la ligne expérimentale composée du câble Bersimis, du faisceau de câble et du câble de garde. De plus, les délestages successifs et inégaux de ces trois câbles peuvent entraîner le balancement d'un ou de plusieurs câbles et créer ainsi un court-circuit si un des câbles en mouvement entre en contact avec un autre câble (Druez et al., 1995). C'est pourquoi le délestage en lui-même peut être plus dangereux que le maintien. En comparant le début et la fin des délestages sur le câble Bersimis et sur le câble de garde à l'aide des tableaux 53-1 et 53-3, nous observons que les délestages ne se produisent pas toujours en même temps.

Il est intéressant de regarder à quel moment se produisent les délestages pendant l'événement, plus précisément combien d'heures après l'apparition de la charge maximale ils se sont produits. La dernière colonne du tableau 53 montre le nombre d'heures à partir de l'instant où la charge maximale a été atteinte. La colonne n'indique rien lorsque le délestage s'est produit avant l'apparition de la charge maximale ou au moment de la charge maximale. Dans le cas inverse, le délestage s'est produit après la formation de la charge maximale. L'analyse de quelques événements ayant plusieurs délestages successifs après la formation de la charge maximale montre que le taux de délestage du deuxième délestage est supérieur à celui du premier délestage. S'il y a un troisième délestage, le taux de délestage de ce dernier est supérieur à celui du deuxième délestage. Donc, plus le nombre de délestages augmente, plus le taux de délestage augmente pour chaque délestage successif. Ce résultat n'est pas toujours vrai mais a été observé plusieurs fois pour :

- les événements 8 et 9 du câble Bersimis (tableau 53-1),
- les événements 3, 7 et 8 du câble du faisceau (tableau 53-2),
- l'événement 3 du câble de garde (tableau 53-3),
- les événements 3, 7, 8 et 44 du câble témoin (tableau 53-4),

En conclusion, le câble de garde déleste plus que le câble Bersimis, le câble du faisceau et le câble témoin.

X-7. TYPES DE DÉLESTAGE EN FIN DE PHASE DE MAINTIEN

X-7-1. Distribution des types de délestage en fin de phase de maintien

La figure 81 présente, sous forme d'un histogramme de fréquence, la distribution du type de délestage final en fin de phase de maintien. Rappelons que le délestage final en fin

de phase de maintien correspond au délestage de la phase de délestage (paragraphe III-1 du chapitre III).

Trois types de délestage ont été observés en fin de phase de maintien : bris mécanique, fonte et sublimation. Il y a très peu de délestages avec sublimation. Sur les quatre câbles, nous avons identifié plus de délestages de type bris mécanique que de type fonte. Au Mont Valin, la température de l'air est plus souvent négative que positive pendant les saisons, ce qui pourrait expliquer qu'il y ait moins de cas de délestages par fonte.

Le tableau 54 présente la fréquence des types de délestages observés par type de câble (bris mécanique, fonte, sublimation) et présentés dans le tableau 18.

Tableau 54 : Type de délestage en fin de phase de maintien

	type de délestage en fin de phase de maintien		
	bris mécanique	fonte	sublimation
Bersimis	41	28	1
un câble du faisceau	37	29	1
garde	49	29	2
témoin	41	17	1

X-7-2. Conditions de formation du délestage par bris mécanique en fin de phase de maintien

Au cours de l'identification des phases de maintien et des types de délestages en fin de phase de maintien (tableau 18, chapitre VIII), nous avons remarqué que les bris mécaniques en fin de phase de maintien se produisent très souvent lorsque la température de l'air se situe autour de -6°C . Afin de mieux observer ce phénomène, nous avons réalisé le tableau 55 qui donne des précisions sur les conditions du délestage par bris mécanique en fin de phase de maintien. La notation T(BM) représente la température au moment où se produit

le délestage par bris mécanique. La notation T représente la température en général. La notation BM signifie bris mécanique.

Le tableau 55 donne des informations sur l'augmentation ou la diminution de la température de l'air avant ou après le bris mécanique, sur la valeur de la vitesse du vent ou sur les pics de vent, sur l'inversion de la direction du vent perpendiculaire (passage d'Est à Ouest ou d'Ouest à Est), sur une fonte consécutive au bris mécanique.

Pour chacun des câbles, nous avons répertorié les événements dont le bris mécanique se produit autour de -6°C , précisément entre -4°C et -8°C :

- sur le câble Bersimis, les événements 1, 2, 5, 14, 17, 19, 20, 28, 36, 37, 53, 61, 65 et 71, soit 34 % des événements ayant un délestage par bris mécanique;
- sur le câble du faisceau, les événements 1, 2, 4, 5, 16, 20, 21, 27, 31, 38, 39, 53, 54 et 66, soit 38 % des événements ayant un délestage par bris mécanique;
- sur le câble de garde, les événements 1, 2, 4, 5, 10, 11, 18, 20, 22, 29, 35, 36, 45, 64, 70, 73, 77 et 80, soit 37 % des événements ayant un délestage par bris mécanique;
- sur le câble témoin, les événements 1, 2, 5, 8, 15, 16, 18, 20, 25, 26, 29, 33, 34, 47, 56, 58 et 61, soit 41 % des événements ayant un délestage par bris mécanique.

Les délestages par bris mécanique se produisent le plus souvent lors de l'augmentation subite de la valeur du vent (pic de vent), lors de variations importantes de la température, lors de l'inversion de la direction du vent perpendiculaire. Le vent n'est donc pas la seule cause possible du délestage par bris mécanique. À titre d'exemple dans le cas des variations de température, nous avons observé une baisse de température de -3°C à -20°C en trois heures et demi, au cours du délestage par bris mécanique. Dans le cas d'inversion du vent perpendiculaire, c'est à dire lorsque le vent passe d'Est à Ouest ou d'Ouest à Est, cela correspond en général à un passage frontal entraînant des conditions atmosphériques

nouvelles et donc le plus souvent la formation d'un nouveau type de glace qui est soit du verglas, soit du givre.

X-7-3. Coefficient de corrélation entre le type de délestage et le type de glace ou de mélange

Bernardin (1989) a réalisé une régression linéaire multiple portant sur les facteurs influençant le taux de délestage. Dans son étude, elle écrit: "On peut constater que les conditions atmosphériques pendant la période d'accumulation et, par conséquent le type de glace, affectent moins le délestage que les conditions observées pendant la phase de délestage. Il serait néanmoins hasardeux d'en conclure que le type de glace a peu d'influence sur le délestage". C'est pourquoi, il semble intéressant d'étudier l'influence du type de mélange présent pendant la phase de maintien sur le type de délestage de la dernière phase. Il est évident que le type de glace ou de mélange se terminant par du verglas sera plus souvent sujet à un délestage par fonte, à la différence d'un mélange se terminant par du givre. En effet, les températures de formation du verglas oscillant autour de 0°C, le verglas est plus susceptible de subir un délestage par fonte se produisant à une température positive.

Le tableau 56 présente le coefficient de corrélation entre le type de délestage et le type de glace ou de mélange présent pendant la phase de maintien.

Tableau 56 : Coefficient de corrélation entre le type de délestage
et le type de glace ou de mélange

	Bersimis	un câble du faisceau	garde	témoin
	type de glace ou de mélange pendant la phase de maintien			
type de délestage en fin de phase de maintien	0,35	0,23	0,15	0,25

Les coefficients de corrélation ne sont pas assez élevés pour conclure que le type de glace ou de mélange présent sur le câble pendant la phase de maintien a une influence sur le type de délestage. Cependant, cela ne signifie pas que le type de glace ou de mélange a peu d'influence sur le type de délestage. Par conséquent, le point de vue développé par Bernardin (1989) concernant l'influence du type de glace sur le délestage demeure toujours sans réponse.

X-8. CONCLUSION

Dans cette partie, nous présentons les résultats principaux de ce chapitre et du chapitre précédent et nous faisons une synthèse de ces résultats.

Au paragraphe VIII-2 (tableau 14 du chapitre VIII), nous avons observé, dans l'ordre décroissant, un plus grand nombre d'événements sur le câble de garde (85 événements), sur le câble Bersimis et sur un câble du faisceau (75 événements), et sur le câble témoin (62 événements).

Au paragraphe IX-2-1 du chapitre IX, nous avons vu que la moyenne et le maximum de la charge maximale sont, dans l'ordre décroissant, plus élevés sur le câble de garde, sur le câble Bersimis, sur le câble du faisceau, et sur le câble témoin.

Au paragraphe X-5-1 de ce chapitre, nous avons vu que, pour environ 80 % des événements, la durée moyenne de la phase de maintien est plus longue sur le câble Bersimis et sur le câble du faisceau que sur le câble de garde.

Au paragraphe X-6 de ce chapitre, nous avons vu que le câble de garde déleste plus que le câble Bersimis, le câble du faisceau et le câble témoin.

En tenant compte de ces résultats, nous pouvons conclure que la glace se maintient plus longtemps sur le câble Bersimis que sur le câble de garde. La phase de maintien de la glace est plus courte sur le câble de garde car ce câble déleste plus que le câble Bersimis. De plus, nous savons que les charges de glace maximales sont plus importantes sur le câble de garde que sur le câble Bersimis. Il reste à déterminer si le fait que le câble de garde déleste plus que le câble Bersimis est lié à la présence de charges maximales plus importantes sur le câble de garde que sur le câble Bersimis.

Nous avons constaté, pour plusieurs saisons, une différence du nombre d'événements entre le câble Bersimis et le câble de garde (tableau 14). Il y a plus d'événements sur le câble de garde que sur le câble Bersimis car un événement commençant en même temps sur le câble de garde et sur le câble Bersimis se termine souvent plus tôt sur le câble de garde. Il est ainsi très fréquent d'observer un long événement sur le câble Bersimis et deux ou trois événements successifs plus courts sur le câble de garde. C'est le cas de l'événement 32 du câble Bersimis (tableau 16-1) et des trois événements successifs 38, 39 et 40 du câble de garde (tableau 16-3). Dans cet exemple, l'événement se termine plus vite sur le câble de garde car ce dernier déleste plus que le câble Bersimis. Nous avons observé le même phénomène pour l'événement 46 du câble Bersimis (tableau 16-1) et les trois événements

successifs 56, 57 et 58 du câble de garde (tableau 16-3). C'est aussi le cas de l'événement 59 du câble Bersimis (tableau 16-1) et des deux événements successifs 70 et 71 du câble de garde (tableau 16-3).

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Notre analyse de la phase de maintien de la glace atmosphérique sur des câbles repose sur les douze saisons de givrage, de 86-87 à 97-98, de la station de givrage du Mont Valin (Québec, Canada). Une très grande partie de notre étude a dû être consacrée au recueil des données et à leur traitement avant de pouvoir les analyser. Nous avons traité six des douze saisons de givrage. Cette partie fait l'objet d'un travail commun réalisé avec Christophe Portaix (Portaix, 1999). Les critères d'identification du début et de la fin de la phase de maintien ont été définis. Le critère d'identification du début de la phase de maintien est commun au critère de fin de phase de maintien et a donc été réalisé en collaboration avec Christophe Portaix (Portaix, 1999). Le critère d'identification de la fin de la phase de maintien est différent suivant que la phase de maintien est suivie d'une phase de délestage ou non. Par ailleurs, nous avons défini les critères d'identification du givre, du verglas, de la neige mouillée et des mélanges. Enfin, nous avons créé une base de données sur Excel en identifiant les phases de maintien de tous les événements des saisons de 86-87 à 97-98 ainsi que les types de glace (givre, verglas, neige mouillée) et les mélanges. Quatorze mélanges ont été identifiés. Nous avons traité statistiquement cette base de données afin de réaliser deux études : l'une sur la charge maximale atteinte pendant la phase de maintien, l'autre sur la phase de maintien. L'étude statistique porte sur 75 événements du câble Bersimis, 75 événements du câble du faisceau, 85 événements du câble de garde et 62 événements du câble témoin.

Nous avons réalisé une analyse de régression multiple sur la charge de glace maximale des événements pendant la phase de maintien en fonction des variables suivantes : le type de glace ou de mélange correspondant à la charge maximale, la durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte, la charge de glace en fin

de phase d'accrétion et le taux d'accrétion moyen pendant la phase d'accrétion. La variation de la charge maximale est expliquée par la variable "durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte" et par la variable "charge de glace en fin de phase d'accrétion" à 87,43 %, 79,36 %, 79,19 % et 79,02 % respectivement sur le câble de garde, le câble du faisceau, le câble Bersimis et le câble témoin. La régression a montré que le type de glace ou de mélange correspondant à la charge maximale n'a pas d'influence sur la valeur de la charge maximale. La charge de glace en fin de phase d'accrétion et le taux d'accrétion moyen pendant la phase d'accrétion sont des variables indépendantes.

Dans l'ordre décroissant, la moyenne et le maximum de la charge maximale sont plus élevés sur le câble de garde, le câble Bersimis, le câble du faisceau et le câble témoin. La plus grande valeur des charges maximales est atteinte sur le câble de garde (5,740 kg/m). Pour les quatre câbles, nous observons la même tendance : la charge maximale se situe le plus souvent, dans l'ordre décroissant, au milieu de la phase de maintien, puis au début du maintien et en fin de phase de maintien.

Les types de glace les plus souvent observés pendant la phase de maintien sont du givre, puis du verglas. À eux seuls, le givre et le verglas représentent 66 % des cas sur le câble Bersimis, 65 % sur le câble du faisceau, 70 % sur le câble de garde et 69 % sur le câble témoin. Un seul cas de neige mouillée a été observé sur chaque câble.

La phase de maintien peut durer de quelques heures à quelques mois. La plus longue phase de maintien a duré plus de trois mois. Pour environ 80 % des événements, la durée moyenne de la phase de maintien est plus longue sur le câble Bersimis et sur le câble du faisceau que sur le câble de garde. Dans le cas du givre, du verglas et de la neige mouillée, la durée moyenne de la phase de maintien la plus élevée sur les quatre câbles est obtenue, dans l'ordre décroissant, pour du givre, du verglas et de la neige mouillée. La distribution

de la durée de la phase de maintien est proche de l'allure d'une distribution de loi log-normale. La distribution de la vitesse moyenne du vent perpendiculaire à la ligne expérimentale pendant la phase de maintien est proche de l'allure d'une distribution de loi normale. Les types de glace ou de mélange qui se maintiennent le plus longtemps pendant la phase de maintien sont M11 et M12 sur le câble Bersimis et sur le câble de garde, M12 sur le câble du faisceau, M1 et M7 sur le câble témoin.

L'observation des délestages de glace de grande amplitude pendant la phase de maintien montre que les taux de déstage maximum sont plus importants, dans l'ordre décroissant, sur le câble de garde, sur le câble Bersimis, sur le câble du faisceau et sur le câble témoin.

Nous pouvons conclure que la glace se maintient plus longtemps sur le câble Bersimis et sur le câble du faisceau que sur le câble de garde. De plus, les charges de glace maximales sont plus importantes sur le câble de garde que sur le câble Bersimis, le câble du faisceau et le câble témoin. Enfin, pendant la phase de maintien, le câble de garde déteste plus que le câble Bersimis, le câble du faisceau et le câble témoin.

Il serait utile de valider l'équation du modèle de régression de la charge de glace maximale de l'évènement avec les deux variables suivantes : "la durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte" et "la charge de glace en fin de phase d'accrétion". De cette façon, nous pourrions être en mesure de prévoir les valeurs de charge de glace maximale en fonction de la durée et de la charge de glace en fin de phase d'accrétion. De plus, il faudrait réaliser une étude de fiabilité sur les charges maximales des événements de glace atmosphérique de la station de givrage du Mont Valin (Krishnasamy et al., 1991; Krishnasamy and Kulendran, 1996; Jones and Mulherin, 1998). Enfin, il serait intéressant d'étudier de façon plus détaillée les délestages de glace qui se produisent sur les câbles pendant la phase de maintien.

BIBLIOGRAPHIE

Admirat, P., Sakamoto, Y., (1988), "État de l'art concernant la neige collante sur les lignes aériennes", Proceedings of the Fourth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Paris, France, pp. 7-13.

Admirat, P., Dalle, B., Deneau, V., Dousset, D., Gayet, J.F., Gland, H., Guillot, P., Finello, B., Lapeyre, J.L., Moiroux, L., Personne, P., Strauss, B., (1986), "Les contraintes d'environnement : givre, verglas, neige collante", Exposé de Hervé Gland, Direction des études et recherches d'Électricité de France, Synthèse réalisée par Marcel Fernet, RGE, Vol. 2, n° 4, Avril 1986, France, pp. 2-8.

Admirat, P., Sakamoto, Y., Lapeyre, J.L., Maccagnan, M., (1986) "Quantitative results and proposed mechanisms on wet snow accretion in the Ishiuchi wind-tunnel facilities", Proceedings of the Third International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Vancouver, British Columbia, Canada, 6-8 May, pp. 1-6.

Admirat, P., Lapeyre, J.L., Dalle, B., (1990), "Synthesis of field observations and practical results of the 1983-1990 "wet snow" programme of Électricité de France", Proceedings of the Fifth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Tokyo, Japan, pp. B6-2-(1)- B6-2-(5), 5 pages.

Baillargeon, G., Rainville, J., (1975), "Statistique appliquée, tests statistiques, régression et corrélation", Tome 2, Trois-Rivières, Les Éditions SMG, 1975, 560 pages.

Baillargeon, G., (1989), "Probabilités, statistique et techniques de régression", Trois-Rivières, Les Éditions SMG, 1989, 631 pages.

Baillargeon, G., (1990), "Méthodes statistiques de l'ingénieur", Volume 1, 3^{ème} édition, Trois-Rivières, Les Éditions SMG, 1990, 738 pages.

Bernardin, S., (1989), "Étude 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, 154 pages.

Chaîné, P.M., 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, Météorologie industrielle, Étude IV, Toronto 1974, 11 pages.

Colbeck, S.C., Ackley, S.F., (1982), "Mechanisms for ice bonding in wet snow accretions on power lines", Proceedings of the First International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Hanover, New Hampshire, U.S.A., 6 pages.

Csomor, M., Rezsófi, F., (1988), "Analysis of the meteorological process of ice depositions on transmission line conductors", Proceedings of the Fourth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Paris, France, 5-7 September, pp. 104-108.

Deneau, V., Guillot, P., (1984), "La neige collante, Essai de cartographie du risque sur l'ensemble de la France", Électricité de France, Division Technique Générale, La Houille Blanche, No. 6, Juillet 1984, pp. 465-474.

Dessens, H., Dessens, J., (1976), film "L'homme et les nuages", 16 mm, Service du Film de Recherche Scientifique, Paris, 30 minutes.

Druez, J., (1988), "Étude de givrage au Mont-Valin", Rapport préparé pour Hydro-Québec, Montréal (Québec), contrat # HO 925 887, Novembre 1988, 172 pages.

Druez, J., McComber, P., Félin, B., (1988), "Icing rate measurements made for different cable configurations on an icing test line at Mt. Valin", Proceedings of the Fourth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Paris, France, 5-7 September, pp. 477-485.

Druez, J., Louchez, S., Bouchard, G., (1990), "Study of ice shedding phenomenon on cables", Proceedings of the 9th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Houston, Texas, U.S.A., February 18-23, pp. 143-148.

Druez, J., Laflamme, J., McComber, P., (1991), "Mt. Valin in-cloud icing studies", Canadian Electrical Association, Line Security and Ice Accretion Subsection, Transmission Section, Engineering and Operating Division, May 1991, Toronto, 12 pages.

Druez, J., Louchez, S., McComber, P., (1991), "Cable ice shedding due to the mechanical breaking of ice", Third International Symposium on Cold Regions Heat Transfer, Fairbanks, Alaska, U.S.A, June 12-14, 12 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, Edinburgh, United Kingdom, 11-16 August, pp. 528-534.

Druez, J., McComber, P., (1993), "Étude de givrage au Mont-Valin, 1992-1993", Rapport de recherche pour Hydro-Québec, Subvention de Recherche et Développement Coopérative (CRSNG no. CRD 102637 et Hydro-Québec no. VPET-92-ERE-204-00, U.Q.A.C., vol. 1, Mars 1993, 65 pages.

Druez, J., McComber, P., (1994), "Étude de givrage au Mont-Valin, 1992-1993", Rapport de recherche pour Hydro-Québec, Subvention de Recherche et Développement Coopérative (CRSNG no. CRD 102637 et Hydro-Québec no. VPET-92-ERE-204-00, U.Q.A.C., vol. 2, Février 1994, 384 pages.

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

Druez, J., McComber, P., Laflamme, J., (1995), "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., Boudreault, M., (1996), "Étude de givrage au Mont-Valin, Saison 1993-1994 : Rapport final", *Rapport Scientifique no. 96-06-01, É.R.I.G.S., U.Q.A.C., Juin 1996*, 213 pages.

Druez, J., McComber, P., (1996), "Field data on power line icing", *Transactions of the CSME*, Vol. 20, No. 3, pp. 259-273.

Druez, J., Boudreault, M., (1997), "Étude de givrage au Mont-Valin, Saison 1994-1995 : Rapport final", *Rapport Scientifique no. 97-01-01, É.R.I.G.S., U.Q.A.C., Janvier 1997*, 196 pages.

Druez, J., McComber, P., (1997), "An analysis of the icing of test cables", *Canadian Journal of Civil Engineers*, Vol. 24, pp. 637-648.

Électricité de France, (1977), "La neige collante sur les conducteurs aériens", *Division Technique Générale, fiche d'information DTG No. 61, Grenoble, France, Janvier 1977*, 4 pages.

Elfashny, K., Chouinard, L.E., Laflamme, J., (1996), "Estimation of combined wind and ice loads on telecommunication towers in Québec, phase 1: modeling of the ice and wind observations", *Proceedings of the Seventh International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Chicoutimi, Québec, Canada, 3-7 June*, pp. 137-141.

Gland, H., (1984), "Givre, verglas, neige collante : nature des phénomènes et situations météorologiques correspondantes", Journée d'étude sur la protection des lignes aériennes vis à vis des phénomènes de givre, de neige et de verglas", Électricité de France, D.E.R Département E.A.A.-Chatou, Clamart, France, 25 octobre 1984, 21 pages.

Gland, H., Admirat, P., (1986), "Meteorological Conditions for Wet Snow Occurrence in France. Calculated and Measured Results in a Recent Case Study, on March 5th, 1985", Proceedings of the Third International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Vancouver, Canada, 5 pages.

Gland, H., Lapeyre, J.L., Mery, P., Pourbaix, F., (1986), "Givre et neige collante sur les lignes aériennes", rapport d'Électricité de France, France, pp. 37-50.

Govoni, J.W., Ackley, S.F., (1981), "Icing and Wind Loading on a Simulated Power Line", The Northern Engineer, Vol. 18, No. 1, pp. 23-27.

Govoni, J.W., Ackley, S.F., (1984), "Combined Icing and Wind Loads on a Simulated Power Line Test Span", U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, U.S.A., 9 pages.

Hardy, C., Brunelle, J., Chevalier, J., Manoukian, B., Vilandré, R., (1996), "Telemonitoring of climatic loads on Hydro-Québec 735 kv lines", Proceedings of the Seventh International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Chicoutimi, Québec, Canada, 3-7 June, pp. 169-174.

Hydro-Québec-IREQ, (1998), Hydro Tech, Recherche et Développement, Institut de recherche d'Hydro-Québec - IREQ, Vol. 12, n° 1, automne-hiver 1997-1998, 20 pages.

Jones, K.F., Mulherin, N.D., (1998), "An evaluation of the severity of the January 1998 ice storm in Northern New England", Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Report for Federal Emergency Management Agency Region 1, Hanover, New Hampshire, U.S.A., April 1998, 66 pages.

Kawamura, R., Tatokoro, Y., Hatayama, G., (1990), "Ice accretion environment on Mt. Ibuki in Japan's central mountainous region", Proceedings of the Fifth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Tokyo, Japan, pp. A1-7-(1)-A1-7-(6), 6 pages.

Krishnasamy, S.G., Tabatabai, M., Hathout, I., (1991), "Reliability-based design of overhead transmission structures – an overview", Ontario Hydro, Research Division, Report No. 91-233-K, December 20, 50 pages.

Krishnasamy, S., Kulendran, S., (1996), "Combined wind and ice loads from historical extreme wind and ice data", Proceedings of the Seventh International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Chicoutimi, Québec, Canada, 3-7 June, pp. 119-124.

Kuroiwa, D., (1965), "Icing and Snow Accretion on Electric Wires", Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Research Report 123, Hanover, New Hampshire, U.S.A., January 1965, 10 pages.

Laflamme, J., Latour, A., Côté, Y., (1996), "Description of the Mt-Belair ice load measurements site", Proceedings of the Seventh International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Chicoutimi, Québec, Canada, 3-7 June, page 453.

Laflamme, J.N., (1998), "Persistence of ice deposits on cables and conductors", Proceedings of the Eighth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Reykjavik, Iceland, page 361.

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

Lambrinos, G., Aguirre-Puente, J., Sakly, M., (1987), "Experimental research on the sublimation of ice samples", *Annales Geophysicae*, 5B, pp. 589-594.

Lliboutry, L., (1964), "Traité de glaciologie" Tome 1, Masson, Paris, 428 pages.

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

Lozowski, E.P., Gayet, J.F., (1988), "The atmospheric icing: a review", Proceedings of the Fourth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Paris, France, pp. 1-6.

Makkonen, L., (1984), "Modelling of ice accretion on wires", American Meteorological Society, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 23., pp. 929-933.

McComber, P., Bouchard, D., (1984), "Determination of icing loads from end cable tension", Proceedings of the Second International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Trondheim, Norway, 6 pages.

McComber, P., Druetz, J., Bouchard, D., Falgueret, A., (1987), "Atmospheric Icing Load Measurements on a Cable using the End Tension", *Cold Regions Science and Technology J.*, Vol. 13, pp. 131-141.

McComber, P., Druetz, J., Laflamme, J., (1994), "Icing Rate Meter Estimation of In-Cloud Cable Icing", *Proceedings of the Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan, April 10-15, pp. 495-502.

McComber, P., Latour, A., Druetz, J., Laflamme, J., (1996), "The Icing rate meter, an instrument to evaluate transmission line icing", *Proceedings of the Seventh International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Chicoutimi, Québec, Canada, 3-7 June, pp. 159-168.

Peabody, A.B., (1996), "Measurements of ice and snow loads on the Tyee Lake 138 kv line", *Proceedings of the Seventh International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Chicoutimi, Québec, Canada, 3-7 June, pp. 95-100.

Portaix, C., (1999), "Étude de la phase d'accrétion de la glace atmosphérique sur des câbles", *Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la maîtrise en Ingénierie, Département des Sciences Appliquées*, 187 pages.

Poots, G., (1995), "Ice and Snow Accretion on Structures", *Research Studies Press Ltd., John Wiley & Sons Inc.*, 338 pages.

Shoda, M., (1953), "Studies on snow accretion", *Researches on Snow and Ice*, No. 1, pp. 50-72.

Skelton, P.L.I., Poots, G., (1991), "Snow accretion on overhead line conductors of finite torsional stiffness", *Cold Regions Science and Technology J.*, Vol. 19, pp. 301-316.

Støttrup-Andersen, U., (1996), "Ice risk levels-A practical approach to design", Proceedings of the Seventh International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Chicoutimi, Québec, Canada, 3-7 June, pp. 142-145.

Villeneuve, G.-O, (1974), "Glossaire de météorologie et de climatologie", Les Presses de l'Université Laval, Québec, Collection Chronoma, 645 pages.

Wareing, J.B., Bracey, R.H., (1998), "Failure mechanisms in wood poles under severe conductor ice loading", Proceedings of the Eighth International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Reykjavik, Iceland, pp. 35-41.

Zarling, J.P., (1980), "Heat and mass transfer from freely falling drops at low temperatures", Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL Report 80-18, Hanover, New Hampshire, U.S.A., August 1980, 20 pages.

ANNEXE A

TABLEAUX

Tableau 16 : Identification des phases de maintien

Tableau 16-1 : Cas du câble Bersimis

numéro de l'événement	saison	début de la phase de maintien	fin de la phase de maintien	durée de la phase de maintien (h)	glace ou mélange pendant la phase de maintien	glace ou mélange associé à la charge maximale
1	90-91	90/12/23 13:00	91/02/05 16:00	1059	M3	M3
2	90-91	91/02/07 17:00	91/02/08 02:30	9,5	G	G
3	90-91	91/02/20 12:00	91/03/02 12:00	240	G	M1
4	91-92	91/10/27 14:00	91/10/29 09:00	43	V	V
5	91-92	91/11/17 21:30	91/11/18 08:30	11	G	G
6	91-92	91/11/21 10:30	91/11/22 09:30	23	G	G
7	91-92	91/11/27 03:00	91/11/30 16:30	85,5	M3	M7
8	91-92	91/12/24 05:00	92/01/04 05:30	264,5	G	M3
9	91-92	92/01/05 09:00	92/03/02 23:00	1382	M1	M1
10	91-92	92/03/11 18:30	92/03/20 06:00	203,5	G	V
11	91-92	92/04/22 21:00	92/04/24 05:30	32,5	V	NM
12	92-93	92/11/28 10:00	92/12/09 22:00	276	G	M1
13	92-93	92/12/23 08:30	93/01/02 23:30	255	M3	M3
14	92-93	93/01/04 23:00	93/01/21 17:30	402,5	M1	M4
15	92-93	93/01/23 21:00	93/02/02 21:30	240,5	M3	M3
16	92-93	93/02/03 09:00	93/02/11 22:00	205	G	G
17	92-93	93/04/12 06:30	93/04/13 06:00	23,5	G	G
18	92-93	93/04/19 13:00	93/04/20 09:30	20,5	G	G
19	92-93	93/04/21 11:30	93/04/24 05:30	66	V	V
20	93-94	93/10/11 08:00	93/10/14 06:30	70,5	M4	M5
21	93-94	93/10/22 11:00	93/10/27 11:00	120	V	V
22	93-94	93/10/28 19:00	93/11/02 06:30	107,5	M3	M3
23	93-94	93/11/04 21:00	93/11/06 02:30	29,5	V	V
24	93-94	93/11/07 07:30	93/11/26 01:00	449,5	M7	M3
25	93-94	93/12/06 21:30	93/12/12 14:00	136,5	M3	M2
26	93-94	93/12/21 13:30	94/02/11 07:00	1241,5	M7	M3
27	93-94	94/02/21 08:00	94/03/02 00:30	208,5	G	G
28	93-94	94/03/20 06:30	94/03/21 05:30	23	G	G
29	93-94	94/04/03 13:30	94/04/04 06:00	16,5	V	V
30	94-95	94/10/05 08:00	94/10/06 10:00	26	M1	M6
31	94-95	94/11/21 20:00	94/11/22 00:30	4,5	V	V
32	94-95	94/12/03 06:30	95/01/14 11:00	1012,5	M5	M2
33	94-95	95/01/16 20:30	95/02/22 06:30	874	G	M3
34	94-95	95/03/08 09:30	95/03/13 07:30	118	M1	V
35	94-95	95/04/13 14:00	95/04/14 06:30	16,5	NM	NM
36	94-95	95/04/16 06:00	95/04/18 07:00	49	G	G
37	94-95	95/04/20 10:30	95/04/21 04:30	18	G	G
38	94-95	95/04/25 06:30	95/04/26 06:00	23,5	G	M1

Tableau 16-1 (suite) : Cas du câble Bersimis

numéro de l'événement	saison	début de la phase de maintien	fin de la phase de maintien	durée de la phase de maintien (h)	glace ou mélange pendant la phase de maintien	glace ou mélange associé à la charge maximale
39	95-96	95/10/17 08:00	95/10/18 01:30	17,5	V	V
40	95-96	95/10/25 12:00	95/10/26 18:00	30	V	V
41	95-96	95/10/29 16:30	95/11/03 05:00	108,5	V	V
42	95-96	95/11/10 06:30	95/11/11 11:00	28,5	M4	M5
43	95-96	95/11/13 03:30	95/11/15 13:00	57,5	M4	M5
44	95-96	95/11/23 11:00	95/12/16 07:30	548,5	G	M1
45	95-96	95/12/19 08:00	95/12/20 21:00	37	G	G
46	95-96	95/12/27 15:30	96/01/18 12:00	524,5	M4	G
47	95-96	96/01/20 06:00	96/02/21 02:30	764,5	M8	M9
48	95-96	96/02/29 03:00	96/03/09 12:30	225,5	G	M3
49	95-96	96/03/23 11:00	96/03/24 07:30	20,5	G	G
50	95-96	96/04/05 02:00	96/04/05 07:00	5	G	G
51	95-96	96/04/16 14:00	96/04/18 06:00	40	V	V
52	95-96	96/04/24 04:00	96/04/25 04:30	24,5	V	NM
53	96-97	96/10/03 10:30	96/10/05 06:30	44	M5	M1
54	96-97	96/10/14 15:00	96/10/18 06:00	87	V	V
55	96-97	96/10/26 16:30	96/10/27 07:00	14,5	G	G
56	96-97	96/11/02 11:00	96/11/06 21:00	106	M3	M9
57	96-97	96/11/13 07:30	96/11/15 18:00	58,5	G	G
58	96-97	96/11/23 01:00	96/12/01 19:30	210,5	M4	M4
59	96-97	96/12/03 23:30	97/03/25 06:00	2670,5	M11	M10
60	96-97	97/04/28 23:00	97/04/29 06:00	7	V	V
61	96-97	97/05/02 12:30	97/05/03 01:00	12,5	V	V
62	96-97	97/05/04 18:00	97/05/05 04:00	10	V	V
63	96-97	97/05/07 11:30	97/05/08 04:30	17	V	V
64	96-97	97/05/17 11:00	97/05/18 08:00	21	V	V
65	97-98	97/10/21 11:30	97/10/30 18:00	222,5	M1	M1
66	97-98	97/11/12 09:30	98/01/16 07:30	1558	M12	M9
67	97-98	98/01/19 18:00	98/01/23 04:00	82	G	G
68	97-98	98/01/25 08:00	98/01/27 03:00	43	G	G
69	97-98	98/01/31 19:00	98/02/01 08:30	13,5	G	G
70	97-98	98/02/13 05:30	98/02/16 05:30	72	G	G
71	97-98	98/02/17 06:00	98/02/17 21:00	15	G	G
72	97-98	98/02/21 07:30	98/02/22 07:00	23,5	G	G
73	97-98	98/03/12 06:00	98/03/15 15:00	81	G	M1
74	97-98	98/04/19 06:30	98/04/19 10:30	4	V	V
75	97-98	98/04/26 05:00	98/04/27 06:30	25,5	G	G

Tableau 16-2 : Cas du câble du faisceau

numéro de l'événement	saison	début de la phase de maintien	fin de la phase de maintien	durée de la phase de maintien (h)	glace ou mélange pendant la phase de maintien	glace ou mélange associé à la charge maximale
1	90-91	90/12/23 07:00	91/02/05 16:30	1065,5	M3	M2
2	90-91	91/02/07 17:00	91/02/08 03:30	10,5	G	G
3	90-91	91/02/20 10:00	91/03/02 12:00	242	G	M1
4	91-92	91/10/27 14:00	91/10/29 08:00	42	V	V
5	91-92	91/11/17 21:00	91/11/18 09:30	12,5	G	G
6	91-92	91/11/27 17:30	91/11/30 16:30	71	M3	M7
7	91-92	91/12/24 05:00	92/01/04 05:00	264	G	M3
8	91-92	92/01/05 10:30	92/02/22 11:30	1153	M1	M1
9	91-92	92/02/27 09:00	92/02/27 12:30	3,5	G	G
10	91-92	92/04/22 21:00	92/04/24 05:30	32,5	V	NM
11	92-93	92/10/28 10:30	92/11/03 21:30	155	M4	G
12	92-93	92/11/06 14:00	92/11/10 09:00	91	G	G
13	92-93	92/11/12 01:30	92/11/13 02:00	24,5	V	V
14	92-93	92/11/28 11:00	92/12/09 23:30	276,5	G	G
15	92-93	92/12/23 08:30	93/01/03 00:30	256	M3	M3
16	92-93	93/01/04 22:30	93/01/21 17:30	403	M1	M4
17	92-93	93/01/23 21:00	93/02/02 07:30	226,5	M3	M3
18	92-93	93/02/03 10:30	93/02/11 22:30	204	G	G
19	92-93	93/04/19 13:00	93/04/20 08:30	19,5	G	G
20	92-93	93/04/21 11:30	93/04/24 06:00	66,5	V	V
21	93-94	93/10/11 09:00	93/10/14 07:00	70	M4	M5
22	93-94	93/10/22 11:00	93/10/27 12:30	121,5	V	V
23	93-94	93/10/30 09:30	93/11/02 06:30	69	M1	M1
24	93-94	93/11/04 21:00	93/11/06 02:30	29,5	V	V
25	93-94	93/11/07 07:30	93/11/26 08:30	457	M7	M3
26	93-94	93/12/06 21:30	93/12/12 13:00	135,5	M3	M2
27	93-94	93/12/21 10:30	93/12/21 21:00	10,5	G	G
28	93-94	93/12/22 17:30	94/02/11 08:00	1214,5	M3	M1
29	93-94	94/02/21 08:30	94/02/23 21:00	60,5	G	G
30	93-94	94/03/20 06:00	94/03/21 11:00	29	G	G
31	93-94	94/04/03 12:30	94/04/04 06:30	18	V	V
32	94-95	94/10/05 09:30	94/10/06 10:00	24,5	M1	M6
33	94-95	94/11/21 20:00	94/11/22 00:30	4,5	V	V
34	94-95	94/12/03 07:00	95/01/14 11:00	1012	M5	M2
35	94-95	95/01/16 20:30	95/02/22 14:00	881,5	G	M3
36	94-95	95/03/08 03:30	95/03/13 08:30	125	M1	V
37	94-95	95/04/13 14:00	95/04/14 07:00	17	NM	NM
38	94-95	95/04/16 06:00	95/04/18 08:30	50,5	G	G

Tableau 16-2 (suite) : Cas du câble du faisceau

numéro de l'événement	saison	début de la phase de maintien	fin de la phase de maintien	durée de la phase de maintien (h)	glace ou mélange pendant la phase de maintien	glace ou mélange associé à la charge maximale
39	94-95	95/04/20 10:30	95/04/21 06:00	19,5	G	G
40	94-95	95/04/25 07:30	95/04/26 06:00	22,5	G	M1
41	95-96	95/10/29 16:00	95/11/03 05:00	109	V	V
42	95-96	95/11/10 08:30	95/11/11 11:30	27	M4	M5
43	95-96	95/11/13 03:30	95/11/15 13:00	57,5	M4	M1
44	95-96	95/11/25 08:30	95/12/06 10:30	266	G	M1
45	95-96	95/12/14 05:00	95/12/17 00:00	67	G	G
46	95-96	95/12/19 07:30	95/12/20 14:30	31	G	G
47	95-96	95/12/28 18:00	96/01/18 12:00	498	M4	G
48	95-96	96/01/20 05:00	96/02/21 03:00	766	M8	M9
49	95-96	96/02/29 02:30	96/03/09 12:30	226	G	M3
50	95-96	96/03/23 09:30	96/03/24 09:00	23,5	G	G
51	95-96	96/04/05 07:00	96/04/05 08:30	1,5	G	G
52	95-96	96/04/16 14:00	96/04/18 06:00	40	V	V
53	95-96	96/04/24 04:00	96/04/25 06:00	26	V	NM
54	96-97	96/10/03 10:30	96/10/05 06:30	44	M5	M1
55	96-97	96/10/14 15:00	96/10/18 06:00	87	V	V
56	96-97	96/10/26 15:30	96/10/27 06:00	14,5	G	G
57	96-97	96/11/02 11:00	96/11/06 20:30	105,5	M3	M9
58	96-97	96/11/13 07:00	96/11/15 18:00	59	G	G
59	96-97	96/11/23 05:00	96/12/01 19:00	206	M4	M4
60	96-97	96/12/03 23:30	97/03/25 07:00	2671,5	M12	M9
61	96-97	97/04/28 23:00	97/04/29 07:30	8,5	V	V
62	96-97	97/05/02 12:30	97/05/03 06:00	17,5	V	V
63	96-97	97/05/04 18:30	97/05/05 05:00	10,5	V	V
64	96-97	97/05/07 11:30	97/05/08 07:30	20	V	V
65	96-97	97/05/17 10:30	97/05/18 07:00	20,5	V	V
66	97-98	97/10/21 11:30	97/10/30 17:30	222	M1	M1
67	97-98	97/11/12 08:30	98/01/16 10:00	1561,5	M12	M13
68	97-98	98/01/19 18:00	98/01/23 04:00	82	G	G
69	97-98	98/01/25 07:00	98/01/27 05:30	46,5	G	G
70	97-98	98/01/31 09:30	98/02/01 08:30	23	G	G
71	97-98	98/02/13 06:30	98/02/16 03:30	69	G	G
72	97-98	98/02/17 05:30	98/02/17 23:30	18	G	G
73	97-98	98/03/10 09:00	98/03/16 00:00	135	G	M1
74	97-98	98/03/26 22:00	98/03/27 01:30	3,5	G	G
75	97-98	98/04/19 07:00	98/04/19 12:00	5	V	V

Tableau 16-3 : Cas du câble de garde

numéro de l'événement	saison	début de la phase de maintien	fin de la phase de maintien	durée de la phase de maintien (h)	glace ou mélange pendant la phase de maintien	glace ou mélange associé à la charge maximale
1	90-91	90/12/23 15:00	91/02/05 16:30	1057,5	M3	M3
2	90-91	91/02/07 17:30	91/02/08 02:00	8,5	G	G
3	90-91	91/02/20 12:00	91/03/02 12:00	240	G	M1
4	91-92	91/10/27 14:00	91/10/29 08:00	42	V	V
5	91-92	91/11/17 21:30	91/11/18 08:30	11	G	G
6	91-92	91/11/21 09:30	91/11/22 11:00	25,5	G	G
7	91-92	91/11/27 09:00	91/11/30 16:00	79	M3	M7
8	91-92	91/12/24 05:00	92/01/04 05:00	264	G	M3
9	91-92	92/01/05 10:00	92/03/02 16:00	1374	M1	M1
10	91-92	92/03/05 08:30	92/03/05 11:30	3	G	G
11	91-92	92/03/30 07:00	92/03/30 15:30	8,5	G	G
12	91-92	92/04/08 06:30	92/04/08 14:00	7,5	G	M1
13	91-92	92/04/22 21:30	92/04/24 05:30	32	V	NM
14	92-93	92/10/28 11:30	92/11/03 21:00	153,5	M4	M1
15	92-93	92/11/06 15:00	92/11/13 02:00	155	M4	M5
16	92-93	92/11/28 11:30	92/12/09 22:00	274,5	G	M1
17	92-93	92/12/21 04:30	93/01/03 00:30	308	M3	M3
18	92-93	93/01/04 21:30	93/01/21 17:30	404	M1	M4
19	92-93	93/01/23 21:00	93/02/11 19:30	454,5	M3	M3
20	92-93	93/04/12 06:30	93/04/13 06:00	23,5	G	G
21	92-93	93/04/19 12:30	93/04/23 15:00	98,5	M4	M4
22	93-94	93/10/11 08:30	93/10/14 07:00	70,5	M4	M5
23	93-94	93/10/23 08:30	93/10/27 12:30	100	V	V
24	93-94	93/10/28 18:30	93/10/30 10:00	39,5	V	V
25	93-94	93/11/01 06:00	93/11/02 04:00	22	G	G
26	93-94	93/11/04 21:30	93/11/06 02:30	29	V	V
27	93-94	93/11/07 07:30	93/11/25 23:00	447,5	M7	M3
28	93-94	93/12/06 21:30	93/12/12 13:00	135,5	M3	M2
29	93-94	93/12/20 17:00	93/12/21 21:30	28,5	G	G
30	93-94	93/12/22 12:30	94/01/03 16:00	291,5	G	M1
31	93-94	94/01/18 09:00	94/01/27 12:30	219,5	G	G
32	93-94	94/01/29 00:00	94/02/11 06:30	318,5	G	M1
33	93-94	94/02/21 07:30	94/03/02 03:30	212	G	G
34	93-94	94/03/20 06:30	94/03/21 10:30	28	G	G
35	93-94	94/03/25 20:00	94/03/26 07:30	11,5	G	M1
36	93-94	94/04/03 14:00	94/04/04 07:30	17,5	V	V
37	94-95	94/11/21 20:00	94/11/22 00:00	4	V	V
38	94-95	94/12/03 06:00	94/12/24 02:00	500	M1	M2

Tableau 16-3 (suite) : Cas du câble de garde

numéro de l'événement	saison	début de la phase de maintien	fin de la phase de maintien	durée de la phase de maintien (h)	glace ou mélange pendant la phase de maintien	glace ou mélange associé à la charge maximale
39	94-95	94/12/26 10:30	94/12/27 17:00	30,5	G	G
40	94-95	94/12/28 15:00	94/12/30 21:00	54	G	G
41	94-95	95/01/16 22:00	95/02/20 13:00	831	G	M3
42	94-95	95/03/08 10:00	95/03/11 07:00	69	M1	V
43	94-95	95/03/22 08:00	95/03/22 11:30	3,5	NM	NM
44	94-95	95/04/16 06:30	95/04/18 10:30	52	G	G
45	94-95	95/04/20 10:30	95/04/21 04:30	18	G	G
46	94-95	95/04/25 07:30	95/04/26 06:00	22,5	G	M1
47	95-96	95/10/25 14:00	95/10/26 19:00	29	V	V
48	95-96	95/10/29 16:30	95/11/03 05:00	108,5	V	V
49	95-96	95/11/05 11:30	95/11/07 06:00	42,5	G	G
50	95-96	95/11/08 18:00	95/11/11 10:30	64,5	M4	M1
51	95-96	95/11/13 03:30	95/11/15 13:00	57,5	M4	M1
52	95-96	95/11/24 02:00	95/12/05 19:30	281,5	G	M1
53	95-96	95/12/09 00:00	95/12/09 06:00	6	G	G
54	95-96	95/12/14 02:30	95/12/16 11:30	57	G	G
55	95-96	95/12/19 07:30	95/12/20 00:30	17	G	G
56	95-96	95/12/27 16:00	96/01/10 21:30	341,5	G	G
57	95-96	96/01/14 05:00	96/01/14 13:00	8	G	G
58	95-96	96/01/17 15:00	96/01/18 12:00	21	V	V
59	95-96	96/01/20 00:00	96/02/21 03:00	771	M14	M10
60	95-96	96/02/29 03:00	96/03/09 14:30	227,5	G	M3
61	95-96	96/03/23 11:00	96/03/24 10:00	23	G	G
62	95-96	96/04/05 07:00	96/04/05 09:00	2	G	G
63	95-96	96/04/16 14:30	96/04/18 06:00	39,5	V	V
64	96-97	96/10/03 11:00	96/10/05 06:00	43	M5	M1
65	96-97	96/10/14 14:30	96/10/18 06:30	88	V	V
66	96-97	96/10/26 16:30	96/10/27 07:00	14,5	G	G
67	96-97	96/11/02 11:00	96/11/06 20:30	105,5	M3	M9
68	96-97	96/11/13 07:30	96/11/15 18:00	58,5	G	G
69	96-97	96/11/23 01:30	96/12/01 19:30	210	M4	M4
70	96-97	96/12/03 23:00	96/12/12 10:00	203	M3	M2
71	96-97	96/12/18 00:00	97/03/24 18:30	2322,5	M11	M7
72	96-97	97/04/28 21:00	97/04/29 06:00	9	V	V
73	96-97	97/05/02 13:00	97/05/03 04:00	15	V	V
74	96-97	97/05/04 18:00	97/05/05 11:00	17	V	V
75	96-97	97/05/07 11:30	97/05/08 09:00	21,5	V	V
76	96-97	97/05/17 11:00	97/05/18 08:30	21,5	V	V

Tableau 16-3 (suite) : Cas du câble de garde

numéro de l'événement	saison	début de la phase de maintien	fin de la phase de maintien	durée de la phase de maintien (h)	glace ou mélange pendant la phase de maintien	glace ou mélange associé à la charge maximale
77	97-98	97/10/21 12:30	97/10/30 17:30	221	M1	M1
78	97-98	97/11/12 10:30	98/02/08 09:00	2110,5	M12	M13
79	97-98	98/02/13 03:30	98/02/15 16:00	60,5	G	G
80	97-98	98/02/17 06:00	98/02/17 19:00	13	G	G
81	97-98	98/02/21 18:00	98/02/22 07:00	13	G	G
82	97-98	98/03/12 06:00	98/03/15 13:30	79,5	G	M1
83	97-98	98/03/26 22:00	98/03/27 01:00	3	G	G
84	97-98	98/04/19 07:00	98/04/19 11:30	4,5	V	V
85	97-98	98/04/26 08:00	98/04/27 06:30	22,5	G	G

Tableau 16-4 : Cas du câble témoin

numéro de l'événement	saison	début de la phase de maintien	fin de la phase de maintien	durée de la phase de maintien (h)	glace ou mélange pendant la phase de maintien	glace ou mélange associé à la charge maximale
1	90-91	90/12/28 09:30	91/02/05 16:00	942,5	M3	M3
2	90-91	91/02/07 13:00	91/02/08 05:30	16,5	G	G
3	90-91	91/02/20 08:00	91/03/02 01:00	233	G	M1
4	91-92	91/10/27 13:30	91/10/29 09:30	44	V	V
5	91-92	91/11/17 21:00	91/11/18 09:30	12,5	G	G
6	91-92	91/11/27 06:30	91/11/30 15:30	81	M3	M7
7	91-92	91/12/24 11:00	92/01/04 06:30	259,5	G	M3
8	91-92	92/01/05 09:30	92/03/05 08:30	1439	M1	M1
9	91-92	92/04/22 21:30	92/04/23 00:00	2,5	NM	NM
10	92-93	92/10/28 13:00	92/11/03 21:00	152	G	G
11	92-93	92/11/05 14:30	92/11/10 09:00	114,5	G	M1
12	92-93	92/11/11 13:30	92/11/13 01:30	36	V	V
13	92-93	92/11/28 11:00	92/12/09 23:30	276,5	G	G
14	92-93	92/12/23 21:00	92/12/26 00:00	51	G	M3
15	92-93	93/01/04 23:30	93/01/21 17:30	402	M1	M3
16	92-93	93/01/23 21:00	93/01/24 08:30	11,5	G	G
17	92-93	93/02/03 08:00	93/02/10 01:00	161	G	G
18	92-93	93/04/12 09:30	93/04/13 06:30	21	G	G
19	92-93	93/04/21 11:30	93/04/22 06:00	18,5	V	V
20	93-94	93/10/11 10:30	93/10/14 07:30	69	M4	M1
21	93-94	93/10/25 02:30	93/10/26 07:30	29	V	V
22	93-94	93/11/01 06:00	93/11/02 06:00	24	G	G
23	93-94	93/11/04 18:00	93/11/06 00:00	30	V	V
24	93-94	93/11/07 11:30	93/11/26 07:00	451,5	M7	M3
25	93-94	93/12/06 18:00	93/12/07 13:30	19,5	G	M1
26	93-94	93/12/20 19:30	93/12/21 19:00	23,5	G	G
27	93-94	94/01/02 04:00	94/01/04 12:00	56	G	G
28	93-94	94/02/02 09:30	94/02/12 16:30	247	G	M1
29	93-94	94/03/20 06:30	94/03/21 04:00	21,5	G	G
30	94-95	94/11/02 16:00	94/11/03 18:30	26,5	V	V
31	94-95	94/11/21 20:00	94/11/21 22:30	2,5	V	V
32	94-95	94/12/03 08:00	95/01/14 11:00	1011	M5	M2
33	94-95	95/01/20 09:30	95/02/19 13:30	724	G	G
34	94-95	95/04/20 10:00	95/04/21 04:30	18,5	G	G
35	94-95	95/04/25 09:30	95/04/26 06:00	20,5	G	M1
36	95-96	95/10/17 10:00	95/10/17 23:30	13,5	V	V
37	95-96	95/11/13 14:00	95/11/15 13:00	47	M4	M1
38	95-96	95/11/22 01:30	95/11/23 09:00	31,5	M1	M1

Tableau 16-4 (suite) : Cas du câble témoin

numéro de l'événement	saison	début de la phase de maintien	fin de la phase de maintien	durée de la phase de maintien (h)	glace ou mélange pendant la phase de maintien	glace ou mélange associé à la charge maximale
39	95-96	95/11/26 10:30	95/11/27 08:00	21,5	G	G
40	95-96	95/12/14 05:30	95/12/16 11:30	54	G	G
41	95-96	95/12/19 08:00	95/12/19 10:00	2	G	G
42	95-96	95/12/26 10:30	96/01/12 13:30	411	G	G
43	95-96	96/01/17 11:30	96/01/18 11:30	24	V	V
44	95-96	96/01/20 08:00	96/02/21 03:30	763,5	M14	M9
45	95-96	96/02/28 09:00	96/03/09 05:00	236	G	M3
46	95-96	96/04/16 12:30	96/04/18 06:00	41,5	V	V
47	96-97	96/10/03 10:30	96/10/05 06:00	43,5	M5	V
48	96-97	96/10/14 12:30	96/10/18 05:30	89	V	V
49	96-97	96/10/26 19:00	96/10/27 06:00	11	G	G
50	96-97	96/11/02 13:30	96/11/06 20:30	103	M3	M13
51	96-97	96/11/13 00:30	96/11/15 17:30	65	G	G
52	96-97	96/11/23 05:00	96/12/01 17:30	204,5	M4	M4
53	96-97	96/12/03 12:00	96/12/12 09:00	213	M3	M2
54	96-97	96/12/17 05:30	97/02/20 09:30	1564	M7	M7
55	96-97	97/02/21 15:00	97/03/14 09:00	498	M3	G
56	96-97	97/05/02 09:00	97/05/03 01:00	16	V	V
57	96-97	97/05/07 11:30	97/05/08 04:30	17	V	V
58	97-98	97/10/21 11:30	97/10/31 03:30	232	M1	M1
59	97-98	97/11/12 11:30	98/01/03 14:30	1251	M8	M9
60	97-98	98/02/13 07:30	98/02/15 10:00	50,5	G	G
61	97-98	98/02/17 06:00	98/02/17 20:30	14,5	G	G
62	97-98	98/03/12 06:00	98/03/14 18:00	60	G	M1

Tableau 17-1 : Cas du câble Bersimis

numéro de l'événement	charge maximale pendant la phase de maintien (kg/m)	coefficient de variation de la charge pendant la phase de maintien (%)	charge minimale pendant la phase de maintien (kg/m)	position de la charge maximale A:début; B:milieu; C:fin
1	2,566	53	0,071	B
2	0,134	16	0,089	A
3	0,960	25	0,237	B
4	0,630	5	0,524	A
5	0,727	3	0,661	B
6	0,098	6	0,076	A
7	1,758	13	1,173	B
8	1,590	40	0,098	B
9	1,838	54	0,121	B
10	0,690	40	0,093	A
11	0,401	29	0,141	A
12	1,338	28	0,284	B
13	0,844	43	0,116	B
14	1,098	35	0,350	B
15	0,264	30	0,053	B
16	0,193	15	0,096	B
17	0,184	20	0,096	A
18	0,444	9	0,316	A
19	0,424	23	0,178	A
20	1,557	16	0,917	B
21	0,506	21	0,160	B
22	0,254	47	0,052	B
23	0,394	17	0,223	C
24	3,509	39	0,629	B
25	0,817	23	0,314	B
26	0,714	39	0,057	B
27	0,212	24	0,080	B
28	0,249	9	0,189	A
29	0,094	5	0,077	A
30	0,291	30	0,094	C
31	0,208	3	0,191	A
32	4,751	36	1,137	B
33	1,031	70	0,051	B
34	0,154	25	0,063	A
35	0,103	3	0,091	A
36	0,197	30	0,071	C
37	0,246	4	0,208	B
38	1,503	9	1,157	A

Tableau 17-1 (suite) : Cas du câble Bersimis

numéro de l'événement	charge maximale pendant la phase de maintien (kg/m)	coefficient de variation de la charge pendant la phase de maintien (%)	charge minimale pendant la phase de maintien (kg/m)	position de la charge maximale A:début; B:milieu; C:fin
39	0,837	36	0,389	B
40	0,140	14	0,086	A
41	2,046	114	0,137	C
42	0,277	19	0,157	C
43	0,497	6	0,320	C
44	0,877	93	0,069	B
45	0,120	28	0,051	A
46	1,697	58	0,129	A
47	1,237	44	0,103	B
48	1,374	50	0,294	A
49	0,209	30	0,069	A
50	0,123	2	0,117	C
51	1,151	4	1,020	A
52	0,140	18	0,077	B
53	0,494	7	0,389	B
54	0,334	30	0,109	A
55	0,314	3	0,286	B
56	1,026	23	0,509	B
57	0,900	7	0,700	B
58	1,688	28	0,583	C
59	4,000	58	0,054	B
60	0,117	5	0,100	A
61	0,240	17	0,151	A
62	0,160	2	0,151	B
63	0,229	5	0,189	A
64	0,897	52	0,103	C
65	1,811	43	0,394	C
66	3,774	74	0,051	B
67	0,320	23	0,137	B
68	0,140	22	0,063	A
69	0,280	4	0,251	A
70	0,226	17	0,097	B
71	0,231	3	0,209	A
72	0,146	5	0,120	B
73	0,243	16	0,111	B
74	0,686	2	0,657	A
75	0,143	22	0,069	A

Tableau 17-2 : Cas du câble du faisceau

numéro de l'événement	charge maximale pendant la phase de maintien (kg/m)	coefficient de variation de la charge pendant la phase de maintien (%)	charge minimale pendant la phase de maintien (kg/m)	position de la charge maximale A:début; B:milieu; C:fin
1	1,982	47	0,108	B
2	0,126	16	0,084	A
3	0,938	24	0,098	B
4	0,605	4	0,517	B
5	0,471	6	0,396	A
6	1,464	16	0,935	B
7	1,227	37	0,113	B
8	1,464	61	0,053	B
9	0,197	6	0,169	A
10	0,317	36	0,081	A
11	0,909	41	0,106	B
12	0,185	13	0,102	C
13	0,589	38	0,181	C
14	1,076	30	0,213	C
15	0,584	37	0,120	B
16	0,877	37	0,264	B
17	0,222	25	0,088	B
18	0,167	16	0,083	B
19	0,301	24	0,097	A
20	0,366	32	0,106	A
21	1,088	12	0,740	B
22	0,332	28	0,081	B
23	0,225	39	0,053	B
24	0,318	28	0,141	C
25	2,188	48	0,415	B
26	0,568	21	0,239	B
27	0,113	15	0,067	B
28	0,480	35	0,076	B
29	0,113	11	0,076	B
30	0,239	13	0,151	A
31	0,076	12	0,053	A
32	0,260	22	0,106	C
33	0,223	2	0,209	A
34	2,640	69	0,195	B
35	0,960	43	0,083	B
36	0,807	42	0,111	A
37	0,093	8	0,069	A
38	0,162	29	0,065	B

Tableau 17-2 (suite) : Cas du câble du faisceau

numéro de l'événement	charge maximale pendant la phase de maintien (kg/m)	coefficient de variation de la charge pendant la phase de maintien (%)	charge minimale pendant la phase de maintien (kg/m)	position de la charge maximale A:début; B:milieu; C:fin
39	0,185	3	0,162	B
40	1,202	11	0,872	A
41	1,717	144	0,070	C
42	0,209	27	0,093	C
43	0,362	7	0,246	B
44	0,705	89	0,056	A
45	0,176	26	0,065	A
46	0,107	21	0,051	B
47	1,578	51	0,111	A
48	0,998	43	0,107	B
49	1,076	43	0,274	A
50	0,153	28	0,065	A
51	0,125	2	0,121	A
52	1,114	6	0,942	A
53	0,125	23	0,060	A
54	0,376	8	0,288	B
55	0,251	33	0,079	A
56	0,274	4	0,237	C
57	0,896	22	0,455	B
58	0,640	8	0,473	B
59	1,415	21	0,445	C
60	3,295	58	0,116	B
61	0,144	4	0,125	A
62	0,232	19	0,125	A
63	0,158	1	0,158	A
64	0,269	5	0,223	A
65	0,701	37	0,172	C
66	1,206	38	0,320	C
67	2,761	61	0,111	B
68	0,339	15	0,204	B
69	0,209	9	0,153	A
70	0,223	3	0,200	C
71	0,162	16	0,074	B
72	0,204	4	0,181	A
73	0,195	22	0,065	B
74	0,204	2	0,195	B
75	0,515	1	0,497	A

Tableau 17-3 : Cas du câble de garde

numéro de l'événement	charge maximale pendant la phase de maintien (kg/m)	coefficient de variation de la charge pendant la phase de maintien (%)	charge minimale pendant la phase de maintien (kg/m)	position de la charge maximale A:début; B:milieu; C:fin
1	2,024	45	0,058	B
2	0,176	25	0,094	A
3	1,007	26	0,250	B
4	0,377	6	0,297	B
5	1,080	3	0,975	A
6	0,116	5	0,095	A
7	2,366	14	1,494	B
8	1,891	41	0,129	B
9	1,990	73	0,065	B
10	0,159	7	0,131	A
11	0,175	6	0,136	A
12	0,328	5	0,269	C
13	0,321	42	0,062	A
14	1,754	29	0,381	B
15	1,171	29	0,243	C
16	1,442	23	0,471	B
17	0,691	42	0,080	B
18	1,315	70	0,100	B
19	0,627	27	0,146	B
20	0,172	17	0,103	A
21	0,967	27	0,384	B
22	1,367	22	0,727	B
23	0,640	32	0,239	B
24	0,196	24	0,086	C
25	0,188	10	0,132	C
26	0,395	17	0,219	C
27	3,371	44	0,426	B
28	1,295	21	0,513	B
29	0,216	27	0,075	B
30	0,377	35	0,088	B
31	0,226	25	0,080	B
32	0,410	36	0,106	B
33	0,275	27	0,080	B
34	0,252	15	0,155	A
35	0,203	5	0,170	A
36	0,111	5	0,091	A
37	0,128	4	0,115	A
38	3,912	29	0,171	B

Tableau 17-3 (suite) : Cas du câble de garde

numéro de l'événement	charge maximale pendant la phase de maintien (kg/m)	coefficient de variation de la charge pendant la phase de maintien (%)	charge minimale pendant la phase de maintien (kg/m)	position de la charge maximale A:début; B:milieu; C:fin
39	0,171	23	0,059	A
40	0,210	11	0,135	C
41	1,386	46	0,138	B
42	0,112	19	0,056	A
43	0,097	1	0,094	C
44	0,422	53	0,094	C
45	0,307	6	0,250	B
46	2,120	40	0,826	A
47	0,128	12	0,079	A
48	1,849	105	0,102	C
49	0,169	13	0,100	B
50	0,348	28	0,120	B
51	0,404	15	0,210	B
52	1,179	74	0,089	A
53	0,118	1	0,115	A
54	0,182	43	0,051	A
55	0,120	3	0,105	B
56	2,115	26	0,386	A
57	0,107	18	0,069	A
58	0,325	26	0,156	C
59	1,261	47	0,066	B
60	1,411	28	0,499	A
61	0,322	6	0,253	C
62	0,118	1	0,115	A
63	1,013	6	0,836	B
64	0,519	8	0,399	B
65	0,412	29	0,118	A
66	0,358	3	0,322	A
67	1,365	30	0,547	B
68	1,194	10	0,864	C
69	1,969	31	0,580	C
70	1,695	27	0,734	B
71	5,740	52	0,051	B
72	0,135	13	0,097	A
73	0,322	23	0,146	A
74	0,325	21	0,138	A
75	0,169	4	0,141	B
76	1,153	57	0,077	C

Tableau 17-3 (suite) : Cas du câble de garde

numéro de l'événement	charge maximale pendant la phase de maintien (kg/m)	coefficient de variation de la charge pendant la phase de maintien (%)	charge minimale pendant la phase de maintien (kg/m)	position de la charge maximale A:début; B:milieu; C:fin
77	2,465	49	0,414	C
78	3,682	67	0,054	B
79	0,294	20	0,138	B
80	0,205	6	0,169	A
81	0,138	7	0,107	C
82	0,133	20	0,051	B
83	0,171	3	0,158	C
84	0,895	1	0,867	A
85	0,164	11	0,107	A

Tableau 17-4 : Cas du câble témoin

numéro de l'événement	charge maximale pendant la phase de maintien (kg/m)	coefficient de variation de la charge pendant la phase de maintien (%)	charge minimale pendant la phase de maintien (kg/m)	position de la charge maximale A:début; B:milieu; C:fin
1	1,051	25	0,072	B
2	0,134	3	0,117	B
3	0,597	25	0,193	B
4	0,183	14	0,099	B
5	0,265	2	0,248	B
6	0,968	20	0,522	B
7	1,231	38	0,089	B
8	1,077	81	0,095	B
9	0,134	3	0,123	A
10	0,715	37	0,132	B
11	0,150	23	0,064	B
12	0,274	23	0,101	C
13	0,443	37	0,079	B
14	0,384	6	0,296	B
15	0,948	23	0,447	B
16	0,108	3	0,097	C
17	0,146	16	0,058	B
18	0,097	18	0,054	A
19	0,097	5	0,083	A
20	0,309	27	0,104	A
21	0,106	14	0,065	B
22	0,157	42	0,052	A
23	0,293	13	0,164	C
24	1,966	49	0,296	B
25	0,246	5	0,204	B
26	0,099	10	0,061	B
27	0,235	16	0,108	B
28	0,506	18	0,187	B
29	0,130	11	0,090	A
30	0,435	4	0,380	B
31	0,078	2	0,075	C
32	2,619	69	0,207	B
33	0,680	65	0,075	A
34	0,100	3	0,089	B
35	0,799	6	0,644	A
36	0,287	44	0,099	A
37	0,244	16	0,131	A
38	0,287	28	0,096	B

Tableau 17-4 (suite) : Cas du câble témoin

numéro de l'événement	charge maximale pendant la phase de maintien (kg/m)	coefficient de variation de la charge pendant la phase de maintien (%)	charge minimale pendant la phase de maintien (kg/m)	position de la charge maximale A:début; B:milieu; C:fin
39	0,118	11	0,082	C
40	0,106	22	0,051	A
41	0,089	0	0,089	A
42	0,899	51	0,058	A
43	0,223	23	0,119	C
44	0,554	40	0,075	B
45	0,804	33	0,247	B
46	0,374	9	0,285	A
47	0,126	12	0,082	A
48	0,153	25	0,065	B
49	0,129	3	0,116	C
50	0,425	21	0,202	B
51	0,399	25	0,098	A
52	1,049	30	0,230	C
53	0,775	14	0,394	B
54	1,190	54	0,070	B
55	0,400	38	0,077	B
56	0,159	20	0,100	B
57	0,158	3	0,136	A
58	0,616	50	0,095	B
59	1,135	68	0,053	B
60	0,096	16	0,052	B
61	0,083	9	0,064	A
62	0,106	16	0,052	B

Tableau 18 : Identification des types de délestage en fin de phase de maintien

Tableau 18-1 : Cas du câble Bersimis

numéro de l'événement	type de délestage en fin de phase de maintien BM:bris mécanique; F:fonte; S:sublimation
1	BM
2	BM
3	F
4	BM
5	BM
6	BM
7	F
8	F
9	BM
10	BM
11	F
12	BM
13	BM
14	BM
15	pas de phase de délestage
16	BM
17	BM
18	F
19	BM
20	BM
21	F
22	BM
23	F
24	BM
25	BM
26	S
27	BM
28	BM
29	BM
30	F
31	F
32	F
33	BM
34	F
35	F
36	BM
37	BM
38	F

Tableau 18-1 (suite) : Cas du câble Bersimis

numéro de l'événement	type de délestage en fin de phase de maintien BM:bris mécanique; F:fonte; S:sublimation
39	F
40	F
41	F
42	F
43	F
44	BM
45	pas de phase de délestage
46	F
47	F
48	BM
49	BM
50	F
51	F
52	BM
53	BM
54	F
55	BM
56	BM
57	BM
58	F
59	BM
60	F
61	BM
62	BM
63	BM
64	F
65	BM
66	pas de phase de délestage
67	BM
68	BM
69	BM
70	pas de phase de délestage
71	BM
72	BM
73	pas de phase de délestage
74	F
75	F

Tableau 18-2 : Cas du câble du faisceau

numéro de l'événement	type de délestage en fin de phase de maintien BM:bris mécanique; F:fonte; S:sublimation
1	BM
2	BM
3	F
4	BM
5	BM
6	F
7	F
8	pas de phase de délestage
9	BM
10	F
11	F
12	BM
13	F
14	BM
15	BM
16	BM
17	BM
18	BM
19	F
20	BM
21	BM
22	F
23	BM
24	F
25	BM
26	BM
27	BM
28	S
29	BM
30	BM
31	BM
32	F
33	F
34	F
35	pas de phase de délestage
36	F
37	F
38	BM

Tableau 18-2 (suite) : Cas du câble du faisceau

numéro de l'événement	type de délestage en fin de phase de maintien BM:bris mécanique; F:fonte; S:sublimation
39	BM
40	F
41	F
42	F
43	F
44	pas de phase de délestage
45	pas de phase de délestage
46	pas de phase de délestage
47	F
48	F
49	BM
50	BM
51	F
52	F
53	BM
54	BM
55	F
56	BM
57	BM
58	BM
59	F
60	BM
61	F
62	BM
63	BM
64	F
65	F
66	BM
67	pas de phase de délestage
68	BM
69	BM
70	BM
71	pas de phase de délestage
72	BM
73	pas de phase de délestage
74	F
75	F

Tableau 18-3 : Cas du câble de garde

numéro de l'événement	type de délestage en fin de phase de maintien BM:bris mécanique; F:fonte; S:sublimation
1	BM
2	BM
3	F
4	BM
5	BM
6	BM
7	F
8	F
9	BM
10	BM
11	BM
12	BM
13	F
14	F
15	F
16	BM
17	BM
18	BM
19	BM
20	BM
21	BM
22	BM
23	F
24	BM
25	BM
26	F
27	BM
28	BM
29	BM
30	S
31	BM
32	S
33	BM
34	BM
35	BM
36	BM
37	F
38	F

Tableau 18-3 (suite) : Cas du câble de garde

numéro de l'événement	type de délestage en fin de phase de maintien BM:bris mécanique; F:fonte; S:sublimation
39	pas de phase de délestage
40	BM
41	BM
42	BM
43	F
44	BM
45	BM
46	F
47	F
48	F
49	BM
50	F
51	F
52	BM
53	BM
54	pas de phase de délestage
55	BM
56	BM
57	pas de phase de délestage
58	F
59	F
60	BM
61	BM
62	F
63	F
64	BM
65	F
66	BM
67	BM
68	BM
69	F
70	BM
71	BM
72	F
73	BM
74	F
75	F
76	F

Tableau 18-3 (suite) : Cas du câble de garde

numéro de l'événement	type de délestage en fin de phase de maintien BM:bris mécanique; F:fonte; S:sublimation
77	BM
78	pas de phase de délestage
79	BM
80	BM
81	BM
82	pas de phase de délestage
83	F
84	F
85	F

Tableau 18-4 : Cas du câble témoin

numéro de l'événement	type de délestage en fin de phase de maintien BM:bris mécanique; F:fonte; S:sublimation
1	BM
2	BM
3	F
4	BM
5	BM
6	F
7	F
8	BM
9	F
10	F
11	BM
12	F
13	BM
14	BM
15	BM
16	BM
17	BM
18	BM
19	BM
20	BM
21	BM
22	BM
23	F
24	BM
25	BM
26	BM
27	BM
28	S
29	BM
30	BM
31	F
32	F
33	BM
34	BM
35	F
36	BM
37	F
38	BM

Tableau 18-4 (suite) : Cas du câble témoin

numéro de l'événement	type de délestage en fin de phase de maintien BM:bris mécanique; F:fonte; S:sublimation
39	BM
40	pas de phase de délestage
41	BM
42	pas de phase de délestage
43	F
44	F
45	BM
46	F
47	BM
48	F
49	BM
50	BM
51	BM
52	F
53	BM
54	BM
55	BM
56	BM
57	BM
58	BM
59	F
60	pas de phase de délestage
61	BM
62	BM

Tableau 19 : Fréquence des types de glace et de mélange associés à la charge maximale

		G	V	NM	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M9	M10	M13
Bersimis	fréquence	23	19	3	8	2	9	2	3	1	1	3	1	
	%	30,67	25,33	4,00	10,67	2,67	12,00	2,67	4,00	1,33	1,33	4,00	1,33	
un câble du faisceau	fréquence	26	17	3	10	3	6	2	2	1	1	3		1
	%	34,67	22,67	4,00	13,33	4,00	8,00	2,67	2,67	1,33	1,33	4,00		1,33
garde	fréquence	30	18	2	15	3	7	3	2		2	1	1	1
	%	35,29	21,18	2,35	17,65	3,53	8,24	3,53	2,35		2,35	1,18	1,18	1,18
témoin	fréquence	22	14	1	11	2	6	1			2	2		1
	%	35,48	22,58	1,61	17,74	3,23	9,68	1,61			3,23	3,23		1,61

G : givre
 V : verglas
 NM : neige mouillée
 M1 : V-G
 M2 : V-G-V-G
 M3 : G-V-G
 M4 : G-V
 M5 : V-G-V
 M6 : NM-G-NM-G
 M7 : G-V-G-V-G
 M9 : V-G-V-G-V-G
 M10 : V-G-V-G-V-G-V-G
 M13 : V-G-V-G-V

Tableau 39 : Caractéristiques de la charge maximale en kg/m

		G	V	NM	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M9	M10	M13
Bersimis	maximum	1,697	2,046	0,401	1,838	4,751	3,509	1,688	1,557	0,291	1,758	3,774	4	
	minimum	0,098	0,094	0,103	0,243	0,817	0,254	1,098	0,277	0,291	1,758	1,026	4	
	moyenne	0,328	0,523	0,215	1,133	2,784	1,350	1,393	0,777	0,291	1,758	2,012	4	
	écart-type	0,347	0,465	0,133	0,551	1,967	1,019	0,295	0,559	0	0	1,249	0	
	fréquence	23	19	3	8	2	9	2	3	1	1	3	1	
	%	30,67	25,33	4,00	10,67	2,67	12,00	2,67	4,00	1,33	1,33	4,00	1,33	
un câble du faisceau	maximum	1,578	1,717	0,317	1,464	2,640	2,188	1,415	1,088	0,260	1,464	3,295		2,761
	minimum	0,107	0,076	0,093	0,195	0,568	0,222	0,877	0,209	0,260	1,464	0,896		2,761
	moyenne	0,332	0,495	0,178	0,715	1,730	1,043	1,146	0,649	0,260	1,464	1,730		2,761
	écart-type	0,343	0,404	0,099	0,435	0,864	0,611	0,269	0,440	0	0	1,108		0
	fréquence	26	17	3	10	3	6	2	2	1	1	3		1
	%	34,67	22,67	4,00	13,33	4,00	8,00	2,67	2,67	1,33	1,33	4,00		1,33
garde	maximum	2,115	1,849	0,321	2,465	3,912	3,371	1,969	1,367		5,740	1,365	1,261	3,682
	minimum	0,107	0,111	0,097	0,133	1,295	0,627	0,967	1,171		2,366	1,365	1,261	3,682
	moyenne	0,331	0,483	0,209	0,979	2,301	1,629	1,417	1,269		4,053	1,365	1,261	3,682
	écart-type	0,412	0,455	0,112	0,764	1,151	0,866	0,415	0,098		1,687	0	0	0
	fréquence	30	18	2	15	3	7	3	2		2	1	1	1
	%	35,29	21,18	2,35	17,65	3,53	8,24	3,53	2,35		2,35	1,18	1,18	1,18
témoin	maximum	0,899	0,435	0,134	1,077	2,619	1,966	1,049			1,190	1,135		0,425
	minimum	0,083	0,078	0,134	0,106	0,775	0,384	1,049			0,968	0,554		0,425
	moyenne	0,256	0,210	0,134	0,449	1,697	1,064	1,049			1,079	0,845		0,425
	écart-type	0,231	0,104	0	0,287	0,922	0,480	0			0,111	0,291		0
	fréquence	22	14	1	11	2	6	1			2	2		1
	%	35,48	22,58	1,61	17,74	3,23	9,68	1,61			3,23	3,23		1,61
tous les câbles	maximum	2,115	2,046	0,401	2,465	4,751	3,509	1,969	1,557	0,291	5,740	3,774	4	3,682
	câble	garde	Bersimis	Bersimis	garde	Bersimis	Bersimis	garde	Bersimis	Bersimis	garde	Bersimis	Bersimis	garde
	minimum	0,083	0,076	0,093	0,106	0,568	0,222	0,877	0,209	0,260	0,968	0,554	1,261	0,425
câble	témoin	faisceau	faisceau	témoin	faisceau	faisceau	faisceau	faisceau	faisceau	témoin	témoin	garde	témoin	

G : givre M5 : V-G-V
 V : verglas M6 : NM-G-NM-G
 NM : neige mouillée M7 : G-V-G-V-G
 M1 : V-G M9 : V-G-V-G-V-G
 M2 : V-G-V-G M10 : V-G-V-G-V-G-V-G
 M3 : G-V-G M13 : V-G-V-G-V
 M4 : G-V

Tableau 41 : Classification des valeurs de charge maximale sur le câble Bersimis

charge maximale (kg/m)	%	X ₃ minimum (kg/m)	X ₃ maximum (kg/m)	X ₂ minimum (h)	X ₂ maximum (h)	type de glace ou mélange correspondant à la charge maximale
<5,000..5,999>	0					
<4,000..4,999>	2,67	0,708	1,466	499,5	975,5	M2,M10
<3,000..3,999>	2,67	0,652	0,931	266	970	M3,M9
<2,000..2,999>	2,67	0,074	0,229	108,5	811,5	V,M3
<1,000..1,999>	20	0,151	1,697	0	592	G,V,M1,M3,M4,M5,M7,M9
<0,000..0,999>	72	0,094	0,834	0	832,5	G,V,NM,M1,M2,M3,M5,M6

Tableau 42 : Classification des valeurs de charge maximale sur le câble du faisceau

charge maximale (kg/m)	%	X ₃ minimum (kg/m)	X ₃ maximum (kg/m)	X ₂ minimum (h)	X ₂ maximum (h)	type de glace ou mélange correspondant à la charge maximale
<5,000..5,999>	0					
<4,000..4,999>	0					
<3,000..3,999>	1,34	0,622	0,622	975,5	975,5	M9
<2,000..2,999>	4	0,443	1,225	266	511	M2,M3,M13
<1,000..1,999>	17,34	0,112	1,578	0	635	G,V,M1,M2,M3,M4,M5,M7
<0,000..0,999>	77,34	0,076	0,844	0	804	G,V,NM,M1,M2,M3,M4,M5,M6,M9

Tableau 43 : Classification des valeurs de charge maximale sur le câble de garde

charge maximale (kg/m)	%	X ₃ minimum (kg/m)	X ₃ maximum (kg/m)	X ₂ minimum (h)	X ₂ maximum (h)	type de glace ou mélange correspondant à la charge maximale
<5,000..5,999>	1,18	2,490	2,490	639	639	M7
<4,000..4,999>	0					
<3,000..3,999>	3,53	0,777	1,754	209,5	509	M2,M3,M13
<2,000..2,999>	5,88	0,063	2,120	0	730,5	G,M1,M3,M7
<1,000..1,999>	24,71	0,092	1,411	0	584,5	G,V,M1,M2,M3,M4,M5,M9,M10
<0,000..0,999>	64,71	0,094	0,895	0	274,5	G,V,NM,M1,M3,M4

Tableau 44 : Classification des valeurs de charge maximale sur le câble témoin

charge maximale (kg/m)	%	X ₃ minimum (kg/m)	X ₃ maximum (kg/m)	X ₂ minimum (h)	X ₂ maximum (h)	type de glace ou mélange correspondant à la charge maximale
<5,000..5,999>	0					
<4,000..4,999>	0					
<3,000..3,999>	0					
<2,000..2,999>	1,61	1,022	1,022	456	456	M2
<1,000..1,999>	11,29	0,122	0,654	132	656	M1,M3,M4,M7,M9
<0,000..0,999>	87,10	0,066	0,899	0	428	G,V,NM,M1,M2,M3,M7,M9,M13

Tableau 46 : Fréquence des types de glace et des mélanges pendant la phase de maintien

		G	V	NM	M1	M3	M4	M5	M7	M8	M11	M12	M14
Bersimis	fréquence	31	19	1	5	7	5	2	2	1	1	1	
	%	41,33	25,33	1,33	6,67	9,33	6,67	2,67	2,67	1,33	1,33	1,33	
un câble du faisceau	fréquence	31	18	1	6	7	6	2	1	1		2	
	%	41,33	24	1,33	8	9,33	8	2,67	1,33	1,33		2,67	
garde	fréquence	42	18	1	5	7	7	1	1		1	1	1
	%	49,41	21,18	1,18	5,88	8,23	8,23	1,18	1,18		1,18	1,18	1,18
témoin	fréquence	30	13	1	4	5	3	2	2	1			1
	%	48,39	20,97	1,61	6,45	8,06	4,84	3,23	3,23	1,61			1,61

G : givre
 V : verglas
 NM : neige mouillée
 M1 : V-G
 M3 : G-V-G
 M4 : G-V
 M5 : V-G-V
 M7 : G-V-G-V-G
 M8 : G-V-G-V-G-V
 M11 : G-V-G-V-G-V-G-V-G
 M12 : G-V-G-V-G-V-G
 M14 : G-V-G-V-G-V-G-V

Tableau 47 : Caractéristiques de la température moyenne en °C pendant la phase de maintien

		G	V	NM	M1	M3	M4	M5	M7	M8	M11	M12	M14
Bersimis	Tm maximale	-1,7	-0,5	-0,5	-1	-5,5	-4,8	-4	-8,8	-18,4	-14,8	-12,7	
	Tm minimale	-24,4	-7,4	-0,5	-18,7	-20,4	-20	-13	-24	-18,4	-14,8	-12,7	
	Tm moyenne	-11,3	-3,7	-0,5	-11,3	-12,5	-10,6	-8,5	-16,4	-18,4	-14,8	-12,7	
	écart-type	6,5	2	0	7,1	6	5,2	4,5	7,6	0	0	0	
	fréquence	31	19	1	5	7	5	2	2	1	1	1	
	%	41,33	25,33	1,33	6,67	9,33	6,67	2,67	2,67	1,33	1,33	1,33	
un câble du faisceau	Tm maximale	-0,5	-0,5	-0,5	-1	-6,2	-4,8	-4	-8,9	-18,4		-12,7	
	Tm minimale	-24,3	-7,4	-0,5	-18,6	-24,4	-20,5	-13	-8,9	-18,4		-14,8	
	Tm moyenne	-11,1	-3,8	-0,5	-10,4	-15,1	-10	-8,5	-8,9	-18,4		-13,7	
	écart-type	6,5	2,1	0	6,6	6,6	5,2	4,5	0	0		1,1	
	fréquence	31	18	1	6	7	6	2	1	1		2	
	%	41,33	24	1,33	8	9,33	8	2,67	1,33	1,33		2,67	
garde	Tm maximale	-0,6	-0,5	0,1	-5,3	-6,2	-3,4	-4	-8,8		-16	-12,5	-18,4
	Tm minimale	-27,1	-7,4	0,1	-18,7	-21,7	-12	-4	-8,8		-16	-12,5	-18,4
	Tm moyenne	-11,5	-3,9	0,1	-13,7	-12,9	-7,7	-4	-8,8		-16	-12,5	-18,4
	écart-type	7,2	2,1	0	5,2	5,8	2,8	0	0		0	0	0
	fréquence	42	18	1	5	7	7	1	1		1	1	1
	%	49,41	21,18	1,18	5,88	8,23	8,23	1,18	1,18		1,18	1,18	1,18
témoin	Tm maximale	-1,9	-1,4	0,1	-5,3	-6,2	-4,7	-4	-8,8	-12,1			-18,4
	Tm minimale	-26,4	-8,8	0,1	-18,5	-18,1	-12,2	-13	-16,5	-12,1			-18,4
	Tm moyenne	-12,7	-3,8	0,1	-12,3	-11,4	-8	-8,5	-12,6	-12,1			-18,4
	écart-type	7,3	2,2	0	6,2	4,5	3,1	4,5	3,8	0			0
	fréquence	30	13	1	4	5	3	2	2	1			1
	%	48,39	20,97	1,61	6,45	8,06	4,84	3,23	3,23	1,61			1,61

G : givre
 V : verglas
 NM : neige mouillée
 M1 : V-G
 M3 : G-V-G
 M4 : G-V
 M5 : V-G-V
 M7 : G-V-G-V-G
 M8 : G-V-G-V-G-V
 M11 : G-V-G-V-G-V-G-V-G
 M12 : G-V-G-V-G-V-G
 M14 : G-V-G-V-G-V-G-V

Tableau 48 : Caractéristiques du coefficient de variation de la charge de glace en % pendant la phase de maintien

		G	V	NM	M1	M3	M4	M5	M7	M8	M11	M12	M14
Bersimis	maximum	93	114	3	54	53	58	36	39	44	58	74	
	minimum	2	2	3	25	13	6	7	39	44	58	74	
	moyenne	22	21	3	38	33	25	22	39	44	58	74	
	fréquence	31	19	1	5	7	5	2	2	1	1	1	
	fréquence en %	41,33	25,33	1,33	6,67	9,33	6,67	2,67	2,67	1,33	1,33	1,33	
un câble du faisceau	maximum	89	144	8	61	47	51	69	48	43		61	
	minimum	2	1	8	22	16	7	8	48	43		58	
	moyenne	19	25	8	40	29	27	39	48	43		60	
	fréquence	31	18	1	6	7	6	2	1	1		2	
	fréquence en %	41,33	24	1,33	8	9,33	8	2,67	1,33	1,33		2,67	
garde	maximum	74	105	1	73	45	31	8	44		52	67	47
	minimum	1	1	1	19	14	15	8	44		52	67	47
	moyenne	19	24	1	48	29	26	8	44		52	67	47
	fréquence	42	18	1	5	7	7	1	1		1	1	1
	fréquence en %	49,41	21,18	1,18	5,88	8,23	8,23	1,18	1,18		1,18	1,18	1,18
témoin	maximum	65	44	3	81	38	30	69	54	68			40
	minimum	0	2	3	23	14	16	12	49	68			40
	moyenne	19	15	3	45	24	24	41	51	68			40
	fréquence	30	13	1	4	5	3	2	2	1			1
	fréquence en %	48,39	20,97	1,61	6,45	8,06	4,84	3,23	3,23	1,61			1,61

G : givre
 V : verglas
 NM : neige mouillée
 M1 : V-G
 M3 : G-V-G
 M4 : G-V
 M5 : V-G-V
 M7 : G-V-G-V-G
 M8 : G-V-G-V-G-V
 M11 : G-V-G-V-G-V-G-V-G
 M12 : G-V-G-V-G-V-G
 M14 : G-V-G-V-G-V-G-V

Tableau 50 : Caractéristiques de la durée de la phase de maintien en heures

		G	V	NM	M1	M3	M4	M5	M7	M8	M11	M12	M14
Bersimis	maximum	874	120	16,5	1382	1059	524,5	1012,5	1241,5	764,5	2670,5	1558	
	minimum	5	4	16,5	26	85,5	28,5	44	449,5	764,5	2670,5	1558	
	moyenne	120,6	36,4	16,5	430,2	284,3	178,3	528,3	845,5	764,5	2670,5	1558	
	écart-type	182,1	33,6	0	492,1	322,3	184,1	484,3	396	0	0	0	
	fréquence	31	19	1	5	7	5	2	2	1	1	1	
	%	41,33	25,33	1,33	6,67	9,33	6,67	2,67	2,67	1,33	1,33	1,33	
un câble du faisceau	maximum	881,5	121,5	17	1153	1214,5	498	1012	457	766		2671,5	
	minimum	1,5	4,5	17	24,5	71	27	44	457	766		1561,5	
	moyenne	105,3	37,9	17	332,8	439,2	168,9	528	457	766		2116,5	
	écart-type	166,7	34,1	0	386,8	449	159,3	484	0	0		555	
	fréquence	31	18	1	6	7	6	2	1	1		2	
	%	41,33	24	1,33	8	9,33	8	2,67	1,33	1,33		2,67	
garde	maximum	831	108,5	3,5	1374	1057,5	210	43	447,5		2322,5	2110,5	771
	minimum	2	4	3,5	69	79	57,5	43	447,5		2322,5	2110,5	771
	moyenne	101,8	35,5	3,5	513,6	334,7	115,6	43	447,5		2322,5	2110,5	771
	écart-type	155,6	30,5	0	455,1	319	53,7	0	0		0	0	0
	fréquence	42	18	1	5	7	7	1	1		1	1	1
	%	49,41	21,18	1,18	5,88	8,23	8,23	1,18	1,18		1,18	1,18	1,18
témoin	maximum	724	89	2,5	1439	942,5	204,5	1011	1564	1251			763,5
	minimum	2	2,5	2,5	31,5	81	47	43,5	451,5	1251			763,5
	moyenne	113	29,8	2,5	526,1	367,5	106,8	527,3	1007,8	1251			763,5
	écart-type	153,9	20,4	0	543,1	323,6	69,6	483,8	556,3	0			0
	fréquence	30	13	1	4	5	3	2	2	1			1
	%	48,39	20,97	1,61	6,45	8,06	4,84	3,23	3,23	1,61			1,61
tous les câbles	maximum	881,5	121,5	17	1439	1214,5	524,5	1012,5	1564	1251	2670,5	2671,5	771
	câble	faisceau	faisceau	faisceau	témoin	faisceau	Bersimis	Bersimis	témoin	témoin	Bersimis	faisceau	garde
	moyenne	120,6	37,9	17	526,1	439,2	178,3	528,3	1007,8	1251	2670,5	2116,5	771
	câble	Bersimis	faisceau	faisceau	témoin	faisceau	Bersimis	Bersimis	témoin	témoin	Bersimis	faisceau	garde
	minimum	1,5	2,5	2,5	24,5	71	27	43	447,5	764,5	2322,5	1558	763,5
câble	faisceau	témoin	témoin	faisceau	faisceau	faisceau	faisceau	faisceau	Bersimis	garde	Bersimis	témoin	

G : givre
V : verglas
NM : neige mouillée
M1 : V-G
M3 : G-V-G
M4 : G-V
M5 : V-G-V
M7 : G-V-G-V-G
M8 : G-V-G-V-G-V
M11 : G-V-G-V-G-V-G-V-G
M12 : G-V-G-V-G-V-G
M14 : G-V-G-V-G-V-G-V

Tableau 53 : Identification des délestages pendant la phase de maintien

Tableau 53-1 : Cas du câble Bersimis

saïson	numéro de l'événement	Wi (kg/m)	date de Wi	Wf (kg/m)	date de Wf	durée du délestage (h)	Wi-Wf (kg/m)	(Wi-Wf)/Wi (%)	restant de glace (%)	taux de délestage (kg/m.h)	Wi = charge maximale	nombre d'heures après le max (h)
90-91	1	1,563	91/01/08 16:00	1,077	91/01/09 11:30	19,5	0,486	31	69	0,025	non	
90-91	1	1,223	91/01/11 14:30	0,780	91/01/12 06:00	15,5	0,443	36	64	0,029	non	
90-91	1	2,386	91/01/28 08:00	0,837	91/01/28 22:30	14,5	1,548	65	35	0,107	non	47,5
90-91	3	0,817	91/02/28 07:30	0,320	91/03/01 18:30	35	0,497	61	39	0,014	non	65,5
91-92	8	1,413	91/12/30 17:00	0,784	91/12/31 10:00	17	0,629	44	56	0,037	non	18
91-92	8	1,184	92/01/01 20:00	0,496	92/01/02 10:00	14	0,689	58	42	0,049	non	69
91-92	8	0,638	92/01/03 07:00	0,144	92/01/03 14:00	7	0,494	77	23	0,071	non	104
91-92	9	1,184	92/01/14 10:00	0,690	92/01/14 21:30	11,5	0,494	42	58	0,043	non	
91-92	9	1,221	92/01/22 14:00	0,636	92/01/23 10:30	20,5	0,586	48	52	0,029	non	
91-92	9	1,770	92/02/01 04:30	1,367	92/02/02 05:00	24,5	0,403	23	77	0,016	non	51,5
91-92	9	1,376	92/02/02 23:00	0,578	92/02/04 20:00	45	0,797	58	42	0,018	non	94
91-92	9	0,396	92/02/24 07:00	0,124	92/02/25 12:30	29,5	0,271	69	31	0,009	non	
91-92	10	0,690	92/03/11 18:30	0,130	92/03/12 01:30	7	0,560	81	19	0,080	oui	
91-92	11	0,401	92/04/23 00:00	0,153	92/04/23 04:00	4	0,249	62	38	0,062	oui	
93-94	24	3,509	93/11/18 09:30	1,346	93/11/19 19:30	34	2,163	62	38	0,064	oui	
94-95	32	4,751	94/12/24 02:00	1,803	94/12/25 11:30	33,5	2,948	62	38	0,088	oui	
94-95	33	0,740	95/02/03 22:00	0,197	95/02/04 19:00	21	0,543	73	27	0,026	non	
94-95	38	1,400	95/ 4/25 17:30	1,157	95/ 4/25 19:00	1,5	0,243	17	83	0,162	non	11
95-96	39	0,831	95/10/17 12:00	0,420	95/10/17 14:00	2	0,411	49	51	0,206	non	3
95-96	44	0,877	95/11/27 07:30	0,363	95/11/28 03:00	19,5	0,514	59	41	0,026	oui	
95-96	46	1,697	95/12/27 16:00	0,340	95/12/27 17:00	1	1,357	80	20	1,357	oui	
95-96	46	1,566	96/01/05 12:00	1,126	96/01/05 19:00	7	0,440	28	72	0,063	non	
95-96	46	1,234	96/01/07 22:00	0,757	96/01/09 02:30	28,5	0,477	39	61	0,017	non	
95-96	46	0,731	96/01/10 21:30	0,143	96/01/12 19:00	45,5	0,589	80	20	0,013	non	
95-96	47	1,066	96/02/07 04:00	0,717	96/02/07 19:30	15,5	0,349	33	67	0,022	non	
95-96	47	1,237	96/02/10 23:00	0,674	96/02/11 12:30	13,5	0,563	45	55	0,042	oui	
95-96	48	1,194	96/03/02 06:00	0,594	96/03/02 20:00	14	0,600	50	50	0,043	non	27

Tableau 53-1 (suite) : Cas du câble Bersimis

saison	numéro de l'événement	Wi (kg/m)	date de Wi	Wf (kg/m)	date de Wf	durée du délestage (h)	Wi-Wf (kg/m)	(Wi-Wf)/Wi (%)	restant de glace (%)	taux de délestage (kg/m.h)	Wi = charge maximale	nombre d'heures après le max (h)
96-97	58	1,323	96/11/29 12:30	0,589	96/11/29 13:30	1	0,734	56	44	0,734	non	
96-97	64	0,551	97/05/17 11:00	0,103	97/05/17 12:30	1,5	0,449	81	19	0,299	non	
97-98	65	1,214	97/10/26 22:00	0,714	97/10/27 18:30	20,5	0,500	41	59	0,024	non	

Tableau 53-2 : Cas du câble du faisceau

saison	numéro de l'événement	Wi (kg/m)	date de Wi	Wf (kg/m)	date de Wf	durée du délestage (h)	Wi-Wf (kg/m)	(Wi-Wf)/Wi (%)	restant de glace (%)	taux de délestage (kg/m.h)	Wi = charge maximale	nombre d'heures après le max (h)
90-91	1	1,588	91/01/08 06:30	1,091	91/01/09 11:30	29	0,497	31	69	0,017	non	
90-91	1	1,268	91/01/11 14:30	0,929	91/01/12 05:30	15	0,339	27	73	0,023	non	
90-91	1	1,982	91/01/18 18:00	1,541	91/01/18 22:30	4,5	0,441	22	78	0,098	oui	
90-91	1	1,824	91/01/28 08:00	0,637	91/01/28 22:30	14,5	1,188	65	35	0,082	non	
90-91	3	0,901	91/02/26 07:30	0,757	91/02/27 01:30	18	0,144	16	84	0,008	non	17,5
90-91	3	0,827	91/02/28 08:00	0,353	91/03/01 19:30	35,5	0,473	57	43	0,013	non	66
91-92	7	1,074	91/12/30 17:00	0,656	91/12/31 09:00	16	0,418	39	61	0,026	non	18
91-92	7	0,925	92/01/01 20:00	0,382	92/01/02 09:30	13,5	0,543	59	41	0,040	non	69
91-92	7	0,480	92/01/03 07:30	0,187	92/01/03 12:00	4,5	0,292	61	39	0,065	non	104,5
91-92	8	0,916	92/01/14 10:30	0,536	92/01/14 20:30	10	0,381	42	58	0,038	non	
91-92	8	0,948	92/01/22 13:30	0,498	92/01/23 09:00	19,5	0,450	47	53	0,023	non	
91-92	8	1,324	92/02/01 04:30	0,990	92/02/02 05:00	24,5	0,334	25	75	0,014	non	58
91-92	8	1,023	92/02/03 01:30	0,257	92/02/05 00:00	46,5	0,766	75	25	0,016	non	103
91-92	10	0,317	92/04/23 00:00	0,095	92/04/23 04:00	4	0,223	70	30	0,056	oui	
92-93	11	0,900	92/11/02 08:30	0,106	92/11/03 10:00	25,5	0,793	88	12	0,031	non	22
93-94	25	2,188	93/11/18 09:30	0,666	93/11/19 19:30	34	1,522	70	30	0,045	oui	
94-95	34	2,640	94/12/24 03:00	0,431	94/12/25 11:30	32,5	2,209	84	16	0,068	oui	
94-95	35	0,598	95/02/03 22:30	0,320	95/02/04 16:30	18	0,278	47	53	0,015	non	
94-95	36	0,807	95/03/08 03:30	0,144	95/03/08 07:00	3,5	0,664	82	18	0,190	oui	
94-95	40	1,202	95/04/25 07:30	0,881	95/04/25 12:00	4,5	0,320	27	73	0,071	oui	
95-96	44	0,631	95/11/27 07:30	0,227	95/11/28 03:00	19,5	0,404	64	36	0,021	non	47
95-96	47	1,578	95/12/28 18:00	0,589	95/12/28 19:00	1	0,988	63	37	0,988	oui	
95-96	47	0,835	96/01/05 12:00	0,622	96/01/05 18:00	6	0,213	26	74	0,036	non	
95-96	47	0,682	96/01/08 01:30	0,418	96/01/09 05:00	27,5	0,264	39	61	0,010	non	
95-96	47	0,390	96/01/11 04:00	0,251	96/01/11 18:30	14,5	0,139	36	64	0,010	non	
95-96	48	0,872	96/02/07 08:00	0,645	96/02/07 20:00	12	0,227	26	74	0,019	non	
95-96	48	0,998	96/02/10 23:30	0,612	96/02/11 12:00	12,5	0,385	39	61	0,031	oui	

Tableau 53-2 (suite) : Cas du câble du faisceau

saison	numéro de l'événement	Wi (kg/m)	date de Wi	Wf (kg/m)	date de Wf	durée du délestage (h)	Wi-Wf (kg/m)	(Wi-Wf)/Wi (%)	restant de glace (%)	taux de délestage (kg/m.h)	Wi = charge maximale	nombre d'heures après le max (h)
95-96	49	0,998	96/03/02 08:30	0,617	96/03/02 22:30	14	0,381	38	62	0,027	non	54
96-97	59	0,933	96/11/29 08:00	0,552	96/11/29 17:30	9,5	0,381	41	59	0,040	non	
96-97	65	0,487	97/05/17 10:30	0,172	97/05/17 12:30	2	0,316	65	35	0,158	non	
97-98	66	1,002	97/10/27 12:30	0,599	97/10/28 03:00	14,5	0,404	40	60	0,028	non	

Tableau 53-3 : Cas du câble de garde

saison	numéro de l'événement	Wi (kg/m)	date de Wi	Wf (kg/m)	date de Wf	durée du délestage (h)	Wi-Wf (kg/m)	(Wi-Wf)/Wi (%)	restant de glace (%)	taux de délestage (kg/m.h)	Wi = charge maximale	nombre d'heures après le max (h)
90-91	1	1,835	91/01/08 12:00	1,191	91/01/09 11:00	23	0,644	35	65	0,028	non	
90-91	1	1,388	91/01/11 14:30	0,856	91/01/12 05:00	14,5	0,532	38	62	0,037	non	
90-91	1	1,743	91/01/28 08:00	0,807	91/01/28 22:00	14	0,936	54	46	0,067	non	126,5
90-91	3	0,994	91/02/25 18:00	0,761	91/02/27 01:30	31,5	0,233	23	77	0,007	non	4
90-91	3	0,817	91/02/28 12:30	0,339	91/03/01 18:30	30	0,478	58	42	0,016	non	70,5
91-92	8	1,607	91/12/29 04:00	1,221	91/12/29 05:00	1	0,386	24	76	0,386	non	
91-92	8	1,704	91/12/30 17:00	0,850	91/12/31 09:30	16,5	0,854	50	50	0,052	non	18
91-92	8	1,364	92/01/01 20:00	0,459	92/01/02 10:00	14	0,905	66	34	0,065	non	69
91-92	8	0,650	92/01/03 06:30	0,129	92/01/04 03:30	21	0,522	80	20	0,025	non	103,5
91-92	9	1,067	92/01/14 11:00	0,592	92/01/14 22:30	11,5	0,476	45	55	0,041	non	
91-92	9	1,152	92/01/22 09:00	0,328	92/01/23 07:30	22,5	0,823	72	28	0,037	non	
91-92	9	1,793	92/02/01 06:00	1,274	92/02/02 05:00	23	0,519	29	71	0,023	non	59,5
91-92	9	1,256	92/02/03 06:00	0,438	92/02/04 23:00	41	0,818	65	35	0,020	non	107,5
91-92	13	0,310	92/04/23 00:00	0,065	92/04/23 04:00	4	0,245	79	21	0,061	non	2,5
92-93	14	1,691	92/11/02 06:00	0,381	92/11/03 10:00	28	1,309	77	23	0,047	non	16
93-94	27	3,371	93/11/16 01:00	1,124	93/11/16 04:30	3,5	2,248	67	33	0,642	oui	
93-94	27	2,681	93/11/18 09:30	0,467	93/11/19 19:30	34	2,214	83	17	0,065	non	56,5
94-95	38	3,912	94/12/21 20:00	0,171	94/12/22 01:30	5,5	3,741	96	4	0,680	oui	
94-95	41	1,028	95/02/03 00:00	0,414	95/02/04 17:00	17	0,614	60	40	0,036	non	
94-95	46	2,035	95/04/25 17:30	0,826	95/04/25 19:00	1,5	1,209	59	41	0,806	non	10
95-96	52	0,972	95/11/25 04:30	0,560	95/11/25 16:00	11,5	0,412	42	58	0,036	non	26,5
95-96	52	0,583	95/11/27 05:30	0,309	95/11/28 02:30	21	0,274	47	53	0,013	non	75,5
95-96	56	2,099	95/12/27 19:00	0,386	95/12/27 20:00	1	1,713	82	18	1,713	non	3
95-96	56	1,752	96/01/05 12:00	1,222	96/01/05 18:30	6,5	0,529	30	70	0,081	non	
95-96	56	1,348	96/01/07 22:00	0,693	96/01/09 10:30	36,5	0,655	49	51	0,018	non	
95-96	59	1,097	96/02/07 14:30	0,780	96/02/07 20:30	6	0,317	29	71	0,053	non	
95-96	59	1,250	96/02/10 23:00	0,534	96/02/11 12:00	13	0,716	57	43	0,055	non	2,5

Tableau 53-3 (suite) : Cas du câble de garde

saison	numéro de l'événement	Wi (kg/m)	date de Wi	Wf (kg/m)	date de Wf	durée du délestage (h)	Wi-Wf (kg/m)	(Wi-Wf)/Wi (%)	restant de glace (%)	taux de délestage (kg/m.h)	Wi = charge maximale	nombre d'heures après le max (h)
95-96	60	1,281	96/03/02 08:30	0,849	96/03/02 22:30	14	0,432	34	66	0,031	non	53,5
96-97	69	1,314	96/11/29 17:00	0,701	96/11/29 17:30	0,5	0,614	47	53	1,227	non	
96-97	76	0,586	97/05/17 11:00	0,077	97/05/17 12:30	1,5	0,509	87	13	0,339	non	
97-98	77	1,521	97/10/27 13:00	1,099	97/10/28 03:00	14	0,422	28	72	0,030	non	

Tableau 53-4 : Cas du câble témoin

saison	numéro de l'événement	Wi (kg/m)	date de Wi	Wf (kg/m)	date de Wf	durée du délestage (h)	Wi-Wf (kg/m)	(Wi-Wf)/Wi (%)	restant de glace (%)	taux de délestage (kg/m.h)	Wi = charge maximale	nombre d'heures après le max (h)
90-91	1	0,973	91/01/18 07:00	0,654	91/01/18 20:00	13	0,319	33	67	0,025	non	
90-91	1	0,858	91/01/28 08:00	0,466	91/01/28 22:30	14,5	0,393	46	54	0,027	non	
90-91	3	0,555	91/02/22 10:00	0,277	91/02/22 23:30	13,5	0,278	50	50	0,021	non	
90-91	3	0,496	91/02/28 11:30	0,302	91/03/01 02:30	15	0,194	39	61	0,013	non	72
90-91	3	0,335	91/03/01 10:30	0,193	91/03/01 16:30	6	0,142	42	58	0,024	non	95
91-92	7	1,231	91/12/29 23:00	0,818	91/12/30 14:30	15,5	0,413	34	66	0,027	oui	
91-92	7	0,759	92/01/01 20:00	0,270	92/01/02 10:00	14	0,489	64	36	0,035	non	69
91-92	7	0,342	92/01/03 07:00	0,089	92/01/04 04:00	21	0,253	74	26	0,012	non	
91-92	8	0,608	92/01/22 18:30	0,358	92/01/23 07:00	12,5	0,250	41	59	0,020	non	
91-92	8	0,951	92/02/01 05:30	0,625	92/02/02 04:30	23	0,326	34	66	0,014	non	45
91-92	8	0,602	92/02/03 01:30	0,230	92/02/03 14:00	12,5	0,372	62	38	0,030	non	89
92-93	10	0,715	92/11/02 05:30	0,132	92/11/03 10:30	29	0,583	81	19	0,020	oui	
92-93	13	0,443	92/12/09 05:00	0,171	92/12/09 07:00	2	0,272	61	39	0,136	oui	
93-94	24	1,966	93/11/18 11:30	0,396	93/11/19 20:30	33	1,570	80	20	0,048	oui	
94-95	32	1,664	94/12/24 02:30	0,335	94/12/25 07:30	29	1,329	80	20	0,046	non	42,5
94-95	33	0,330	95/02/03 23:30	0,107	95/02/04 18:00	18,5	0,223	68	32	0,012	non	
94-95	35	0,799	95/04/25 09:30	0,654	95/04/25 15:00	5,5	0,146	18	82	0,026	oui	
95-96	36	0,287	95/10/17 10:00	0,122	95/10/17 15:00	5	0,165	58	42	0,033	oui	
95-96	42	0,875	95/12/26 14:30	0,635	95/12/26 17:30	3	0,241	28	72	0,080	non	4
95-96	42	0,707	95/12/27 09:30	0,289	95/12/27 13:30	4	0,418	59	41	0,104	non	23
95-96	42	0,551	95/12/30 01:00	0,250	95/12/30 07:30	6,5	0,301	55	45	0,046	non	86,5
95-96	42	0,473	96/01/08 02:00	0,098	96/01/09 01:30	23,5	0,376	79	21	0,016	non	
95-96	44	0,554	96/02/07 04:00	0,294	96/02/07 20:00	16	0,260	47	53	0,016	oui	
95-96	44	0,553	96/02/10 23:30	0,293	96/02/11 12:00	12,5	0,260	47	53	0,021	non	91,5
95-96	45	0,751	96/03/02 07:30	0,446	96/03/02 21:30	14	0,306	41	59	0,022	non	43,5
96-97	51	0,399	96/11/13 00:30	0,098	96/11/13 01:30	1	0,301	76	24	0,301	oui	
96-97	52	0,667	96/11/29 08:30	0,578	96/11/29 14:30	6	0,089	13	87	0,015	non	

Tableau 53-4 (suite) : Cas du câble témoin

saison	numéro de l'événement	Wi (kg/m)	date de Wi	Wf (kg/m)	date de Wf	durée du délestage (h)	Wi-Wf (kg/m)	(Wi-Wf)/Wi (%)	restant de glace (%)	taux de délestage (kg/m.h)	Wi = charge maximale	nombre d'heures après le max (h)
96-97	52	0,639	96/11/30 18:30	0,377	96/12/01 05:30	11	0,262	41	59	0,024	non	
97-98	58	0,431	97/10/27 10:30	0,254	97/10/28 15:00	28,5	0,177	41	59	0,006	non	

Tableau 55 : Conditions de formation du délestage par bris mécanique
en fin de phase de maintien

Tableau 55-1 : Cas du câble Bersimis

numéro de l'événement	commentaires sur les conditions du délestage par bris mécanique en fin de phase de maintien
1	T(BM) = -4°C, diminution de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire
2	T(BM) = -6°C, augmentation de T
3	
4	augmentation de T à partir de T(BM) = -3,7°C, puis fonte
5	augmentation de T à partir de T(BM) = -7,4°C
6	T(BM) = -2,2°C
7	
8	
9	T(BM) = -18,8°C, pic de vent
10	augmentation de T à partir de T(BM) = -16°C
11	
12	T(BM) = -14,2°C, augmentation de T
13	T(BM) = -22,7°C, augmentation de T
14	T(BM) = -6,6°C, augmentation de T
15	
16	T(BM) = -24,8°C, augmentation de T
17	T(BM) = -6,1°C, augmentation de T, puis fonte
18	
19	T(BM) = -6,9°C, augmentation de T, pic de vent le 93/04/23 égal à 60 km/h, puis fonte
20	T(BM) = -7,9°C, augmentation de T
21	
22	diminution de T jusqu'à T(BM) = -10,8°C, puis augmentation de T
23	
24	T(BM) = -14,4°C, vitesse du vent = 44 km/h,
25	T(BM) = -13,3°C, augmentation de T
26	
27	T(BM) = -21,1°C, augmentation de T
28	T(BM) = -6,3°C, augmentation de T, puis fonte

Tableau 55-1 (suite) : Cas du câble Bersimis

numéro de l'événement	commentaires sur les conditions du délestage par bris mécanique en fin de phase de maintien
29	T(BM) = -8,3°C, augmentation de T, puis fonte
30	
31	
32	
33	T(BM) = -18°C
34	
35	
36	T(BM) = -6,2°C, augmentation de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire, puis fonte
37	T(BM) = -5,3°C, augmentation de T, puis fonte
38	
39	
40	
41	
42	
43	
44	T(BM) = -15,6°C, augmentation de T et vitesse du vent importante
45	
46	
47	
48	augmentation de T jusqu'à T(BM) = -19°C, puis diminution de T, pic de vent
49	T(BM) = -11,7°C, vitesse du vent importante
50	
51	
52	diminution de T jusqu'à T(BM) = -9,2°C, puis augmentation de T, avant BM vitesse du vent = 38 km/h
53	T(BM) = -5,4°C, augmentation de T, puis fonte
54	
55	T(BM) = -2,2°C, augmentation de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire, puis fonte
56	T(BM) = -1,4°C, augmentation de T, puis fonte

Tableau 55-1 (suite) : Cas du câble Bersimis

numéro de l'événement	commentaires sur les conditions du délestage par bris mécanique en fin de phase de maintien
57	T(BM) = -13,8°C, augmentation de T
58	
59	T(BM) = -14,8°C, augmentation de T, pic de vent le 97/03/24, puis fonte
60	
61	diminution de T jusqu'à T(BM) = -6,4°C, puis augmentation de T, le 97/05/02 vitesse du vent = 43 km/h, puis fonte
62	diminution de T jusqu'à T(BM) = -9,3°C, puis augmentation de T, avant BM vitesse du vent = 40 km/h, puis fonte
63	T(BM) = -3,9°C, augmentation de T, puis fonte
64	
65	T(BM) = -5,7°C, pic de vent
66	
67	T(BM) = -21°C, inversion de la direction du vent perpendiculaire et augmentation de la vitesse du vent
68	T(BM) = -27,5°C, augmentation de T, pic de vent le 98/01/26
69	T(BM) = -9,1°C, augmentation de T
70	
71	T(BM) = -7,9°C, diminution de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire, augmentation de la vitesse du vent
72	diminution de T jusqu'à T(BM) = -10,3°C, puis augmentation de T
73	
74	
75	

Tableau 55-2 : Cas du câble du faisceau

numéro de l'événement	commentaires sur les conditions du délestage par bris mécanique en fin de phase de maintien
1	T(BM) = -5,7°C, diminution de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire
2	T(BM) = -6°C, augmentation de T
3	
4	augmentation de T à partir de T(BM) = -4,5°C, puis fonte
5	augmentation de T à partir de T(BM) = -6,8°C
6	
7	
8	
9	T(BM) = -9,7°C, diminution de T
10	
11	
12	augmentation de T à partir de T(BM) = -8,2°C, inversion de la direction du vent perpendiculaire
13	
14	T(BM) = -13,3°C, augmentation de T
15	T(BM) = -21,9°C, augmentation de T
16	T(BM) = -6,6°C, augmentation de T
17	T(BM) = -25,9°C, augmentation de T
18	T(BM) = -24,7°C, augmentation de T
19	
20	T(BM) = -6,1°C, augmentation de T, le 93/04/23 pic de vent à 60 km/h, puis fonte
21	T(BM) = -7,6°C, augmentation de T
22	
23	diminution de T jusqu'à T(BM) = -10,8°C, puis augmentation de T
24	
25	T(BM) = -14,8°C, augmentation de T, pic de vent
26	T(BM) = -13,4°C, augmentation de T
27	T(BM) = -4,8°C, vitesse du vent = 50 km/h, pic de vent à 60 km/h
28	

Tableau 55-2 (suite) : Cas du câble du faisceau

numéro de l'événement	commentaires sur les conditions du délestage par bris mécanique en fin de phase de maintien
29	T(BM) = -17,7°C, augmentation de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire
30	T(BM) = -1,2°C, augmentation de T, puis fonte
31	T(BM) = -7,9°C, augmentation de T, puis fonte
32	
33	
34	
35	
36	
37	
38	T(BM) = -4,2°C, augmentation de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire, puis fonte
39	T(BM) = -4,7°C, augmentation de T, puis fonte
40	
41	
42	
43	
44	
45	
46	
47	
48	
49	augmentation de T jusqu'à T(BM) = -19°C, puis diminution de T, pic de vent
50	T(BM) = -10,4°C, augmentation de T
51	
52	
53	T(BM) = -7,8°C, augmentation de T, avant BM vitesse du vent = 38 km/h
54	T(BM) = -5,4°C, augmentation de T, puis fonte
55	
56	T(BM) = -2,6°C, augmentation de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire, puis fonte

Tableau 55-2 (suite) : Cas du câble du faisceau

numéro de l'événement	commentaires sur les conditions du délestage par bris mécanique en fin de phase de maintien
57	T(BM) = -1,3°C, augmentation de T, puis fonte
58	T(BM) = -13,8°C, augmentation de T
59	
60	T(BM) = -13,4°C, augmentation de T, pic de vent le 97/03/24, puis fonte
61	
62	T(BM) = -3,1°C, augmentation de T, pic de vent le 97/05/02, puis fonte
63	diminution de T jusqu'à T(BM) = -9°C, puis augmentation de T, avant BM vitesse du vent = 40 km/h, puis fonte
64	
65	
66	T(BM) = -5,5°C, pic de vent
67	
68	T(BM) = -21°C, inversion de la direction du vent perpendiculaire et augmentation de la vitesse du vent
69	T(BM) = -25°C, augmentation de T, pic de vent le 98/01/26
70	T(BM) = -9,1°C, augmentation de T
71	
72	T(BM) = -8,2°C, diminution de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire, augmentation de la vitesse du vent
73	
74	
75	

Tableau 55-3 : Cas du câble de garde

numéro de l'événement	commentaires sur les conditions du délestage par bris mécanique en fin de phase de maintien
1	T(BM) = -5,7°C, diminution de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire
2	T(BM) = -6,1°C, augmentation de T
3	
4	augmentation de T à partir de T(BM) = -4,5°C, puis fonte
5	augmentation de T à partir de T(BM) = -7,4°C
6	T(BM) = -0,9°C
7	
8	
9	T(BM) = -19,8°C, pic de vent
10	T(BM) = -5,5°C, inversion de la direction du vent perpendiculaire et pic de vent
11	T(BM) = -4,9°C, pic de vent le 92/03/27 égal à 57 km/h
12	T(BM) = -9,1°C, augmentation de T
13	
14	
15	
16	T(BM) = -14,2°C, augmentation de T
17	T(BM) = -21,9°C, augmentation de T
18	T(BM) = -6,6°C, augmentation de T
19	diminution de T jusqu'à T(BM) = -25,3°C, puis augmentation de T, zone frontale
20	T(BM) = -6,1°C, augmentation de T, puis fonte
21	T(BM) = -2,3°C, augmentation de la vitesse du vent et pic de vent le 93/04/23 égal à 60 km/h
22	T(BM) = -7,6°C, augmentation de T
23	
24	T(BM) = -2,7°C, pic de vent égal à 40 km/h
25	diminution de T jusqu'à T(BM) = -10,2°C, puis augmentation de T, zone frontale
26	
27	augmentation de T jusqu'à T(BM) = -14,7°C, puis diminution de T, vitesse du vent = 40 km/h
28	T(BM) = -13,4°C, augmentation de T

Tableau 55-3 (suite) : Cas du câble de garde

numéro de l'événement	commentaires sur les conditions du délestage par bris mécanique en fin de phase de maintien
29	T(BM) = -4,8°C, pic de vent égal à 60 km/h
30	
31	T(BM) = -12,1°C, augmentation de T et inversion de la direction du vent perpendiculaire
32	
33	T(BM) = -21,2°C, augmentation de T
34	T(BM) = -1,9°C, augmentation de T, puis fonte
35	T(BM) = -6,9°C, augmentation de T
36	T(BM) = -7,3°C, augmentation de T, puis fonte
37	
38	
39	
40	T(BM) = -21,6°C, le 94/12/30 pic de vent, augmentation de T
41	T(BM) = -13,8°C, le 95/02/19 pic de vent à 48 km/h, augmentation de T
42	T(BM) = -17°C
43	
44	T(BM) = -2,2°C, augmentation de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire, puis fonte
45	T(BM) = -5,3°C, augmentation de T, puis fonte
46	
47	
48	
49	T(BM) = -3,3°C, inversion de la direction du vent perpendiculaire, pic de vent
50	
51	
52	T(BM) = -12,6°C, augmentation de T et vitesse du vent importante
53	T(BM) = -17°C, augmentation de T et de la vitesse du vent, inversion de la direction du vent perpendiculaire
54	
55	T(BM) = -12,9°C, augmentation de T
56	T(BM) = -15,6°C

Tableau 55-3 (suite) : Cas du câble de garde

numéro de l'événement	commentaires sur les conditions du délestage par bris mécanique en fin de phase de maintien
57	
58	
59	
60	augmentation de T jusqu'à T(BM) = -18,7°C, puis diminution de T, vitesse du vent = 31 km/h
61	T(BM) = -9,6°C, augmentation de T
62	
63	
64	T(BM) = -5,5°C, augmentation de T, puis fonte
65	
66	T(BM) = -2,2°C, augmentation de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire, puis fonte
67	T(BM) = -1,3°C, augmentation de T, puis fonte
68	T(BM) = -13,8°C, augmentation de T
69	
70	T(BM) = -7,8°C, augmentation de T et de la vitesse du vent
71	T(BM) = -14°C, diminution de jusqu'à T(BM) = -14
72	
73	T(BM) = -6,2°C, augmentation de T, pic de vent le 97/05/02, puis fonte
74	
75	
76	
77	T(BM) = -5,5°C, pic de vent
78	
79	T(BM) = -20°C, augmentation de T
80	T(BM) = -7,1°C, diminution de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire, augmentation de la vitesse du vent
81	diminution de T jusqu'à T(BM) = -10,3°C, puis augmentation de T
82	
83	
84	

Tableau 55-3 (suite) : Cas du câble de garde

numéro de l'événement	commentaires sur les conditions du délestage par bris mécanique en fin de phase de maintien
85	

Tableau 55-4 : Cas du câble témoin

numéro de l'événement	commentaires sur les conditions du délestage par bris mécanique en fin de phase de maintien
1	T(BM) = -4°C, diminution de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire
2	T(BM) = -5,4°C, augmentation de T
3	
4	augmentation de T à partir de T(BM) = -3,2°C, puis fonte
5	augmentation de T à partir de T(BM) = -6,8°C
6	
7	
8	T(BM) = -6,5°C, pic de vent à 35 km/h, 6 heures avant le délestage
9	
10	
11	augmentation de T à partir de T(BM) = -8,2°C, inversion de la direction du vent perpendiculaire
12	
13	T(BM) = -13,3°C, augmentation de T
14	T(BM) = -15,8°C, augmentation de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire
15	T(BM) = -6,6°C, augmentation de T
16	T(BM) = -6,7°C, augmentation de T, pic de vent, inversion de la direction du vent perpendiculaire
17	T(BM) = -14,8°C, augmentation de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire
18	T(BM) = -6,4°C, augmentation de T, puis fonte
19	T(BM) = -2,8°C, augmentation de T juste en dessous de 0°C
20	T(BM) = -7°C, augmentation de T
21	augmentation de T(BM) = -9,6°C à T = -1°C, pic de vent, puis fonte
22	diminution de T jusqu'à T(BM) = -10,9°C, puis augmentation de T
23	
24	T(BM) = -15,9°C, augmentation de T, pic de vent
25	T(BM) = -5,7°C, inversion de la direction du vent perpendiculaire
26	T(BM) = -4,3°C, pic de vent à 50 km/h
27	T(BM) = -20,8°C, pic de vent à 35 km/h
28	

Tableau 55-4 (suite) : Cas du câble témoin

numéro de l'événement	commentaires sur les conditions du délestage par bris mécanique en fin de phase de maintien
29	T(BM) = -6°C, augmentation de T, puis fonte
30	T(BM) = -0,7°C
31	
32	
33	T(BM) = -5°C, vitesse du vent = 47 km/h, diminution de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire
34	T(BM) = -5,3°C, augmentation de T, puis fonte
35	
36	T(BM) = -2,3°C, augmentation de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire, puis fonte
37	
38	T(BM) = -11,2°C, augmentation de T
39	T(BM) = -19,8°C, augmentation de T
40	
41	T(BM) = -16,3°C, augmentation de T
42	
43	
44	
45	T(BM) = -23,9°C, diminution de T
46	
47	T(BM) = -5,5°C, augmentation de T, puis fonte
48	
49	T(BM) = -2,6°C, augmentation de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire, puis fonte
50	T(BM) = -1,3°C, augmentation de T, puis fonte
51	T(BM) = -13,7°C, augmentation de T
52	
53	T(BM) = -8,3°C, augmentation de T, augmentation de la vitesse du vent avant le bris mécanique
54	T(BM) = -17°C, augmentation de T
55	T(BM) = -15,3°C, augmentation de T, vent avant le bris mécanique = 30 km/h
56	diminution de T jusqu'à T(BM) = -6,4°C, puis augmentation de T, puis fonte, le 97/05/02 vitesse du vent = 43 km/h

Tableau 55-4 (suite) : Cas du câble témoin

numéro de l'événement	commentaires sur les conditions du délestage par bris mécanique en fin de phase de maintien
57	T(BM) = -3,9°C, augmentation de T, puis fonte
58	T(BM) = -6,6°C, inversion de la direction du vent perpendiculaire, pic de vent le 97/10/30, puis fonte
59	
60	
61	T(BM) = -7,7°C, diminution de T, inversion de la direction du vent perpendiculaire, augmentation de la vitesse du vent
62	T(BM) = -9°C, diminution de T, pic de vent

ANNEXE B

FIGURES

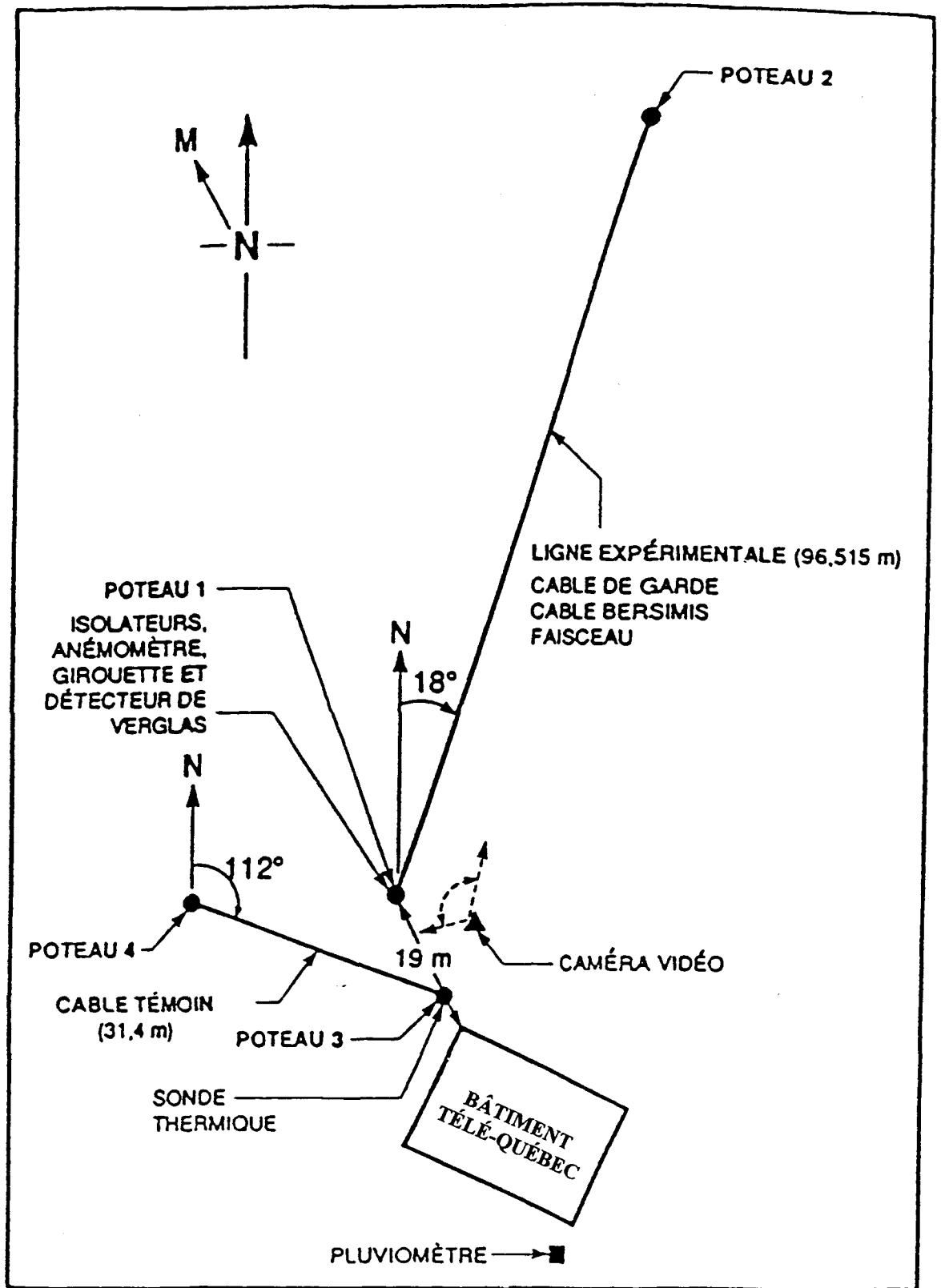


Figure 1 : Description de la station de givrage du Mont Valin

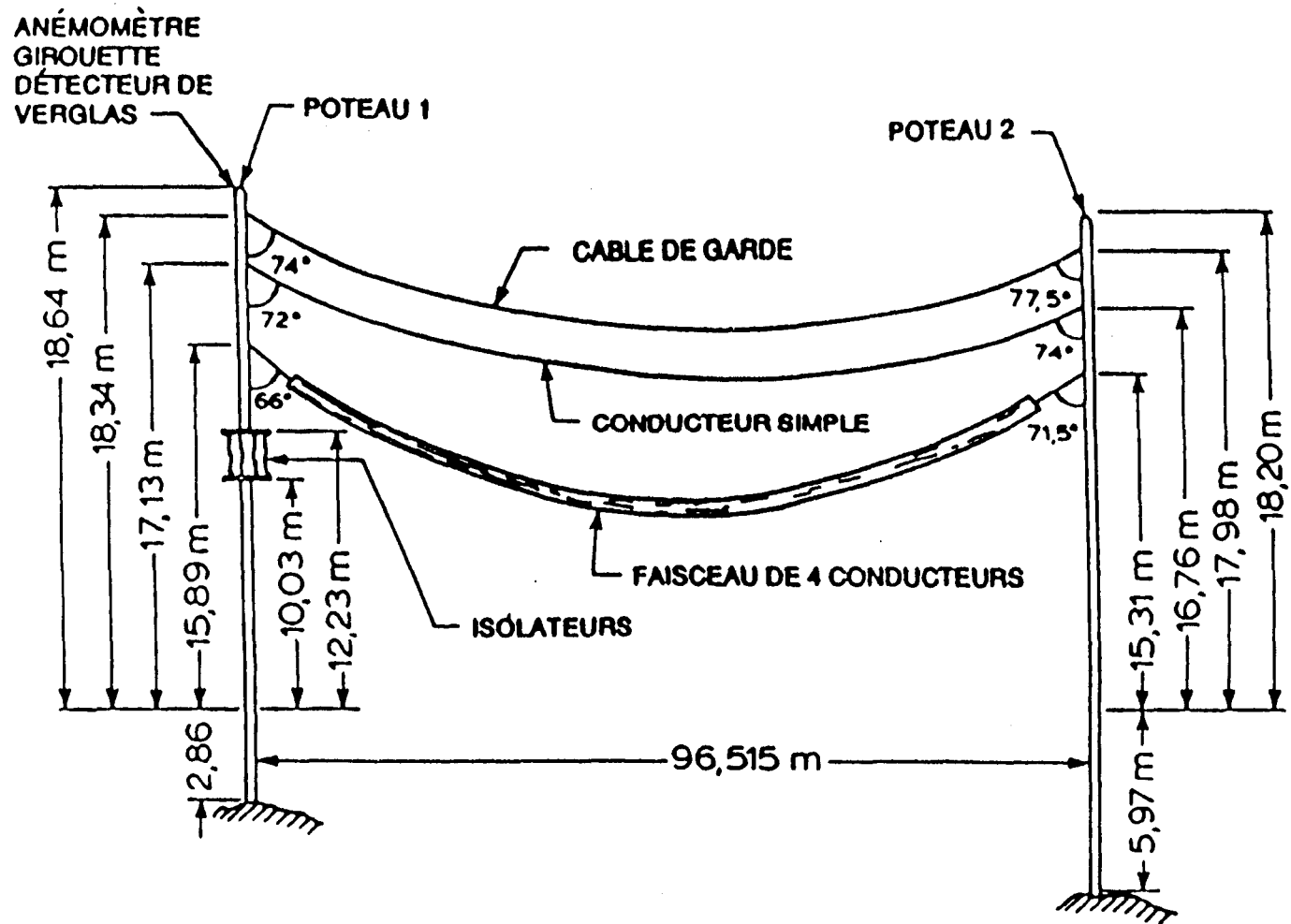


Figure 2 : Caractéristiques de la ligne expérimentale

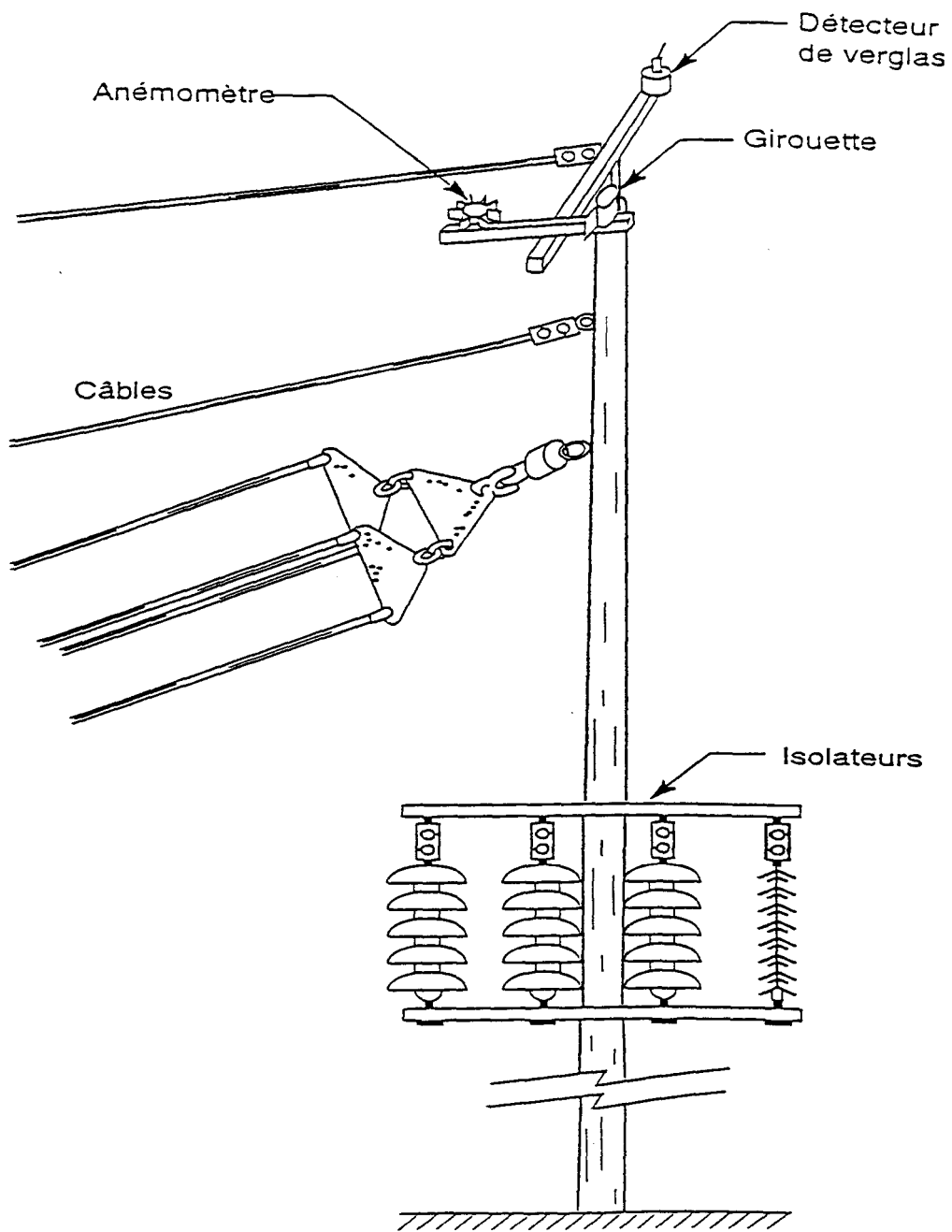


Figure 3 : Caractéristiques du poteau numéro 1

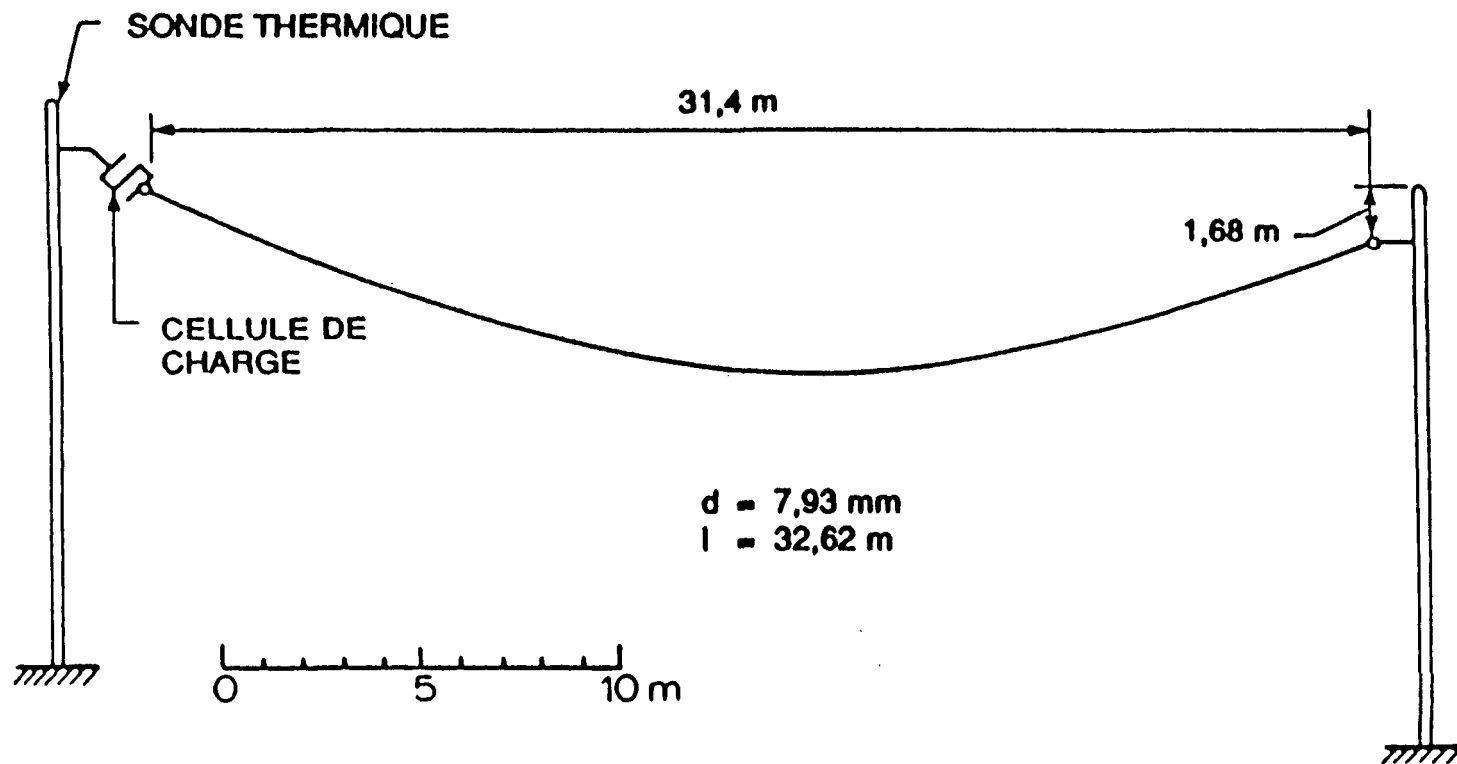


Figure 4 : Caractéristiques de la ligne témoin

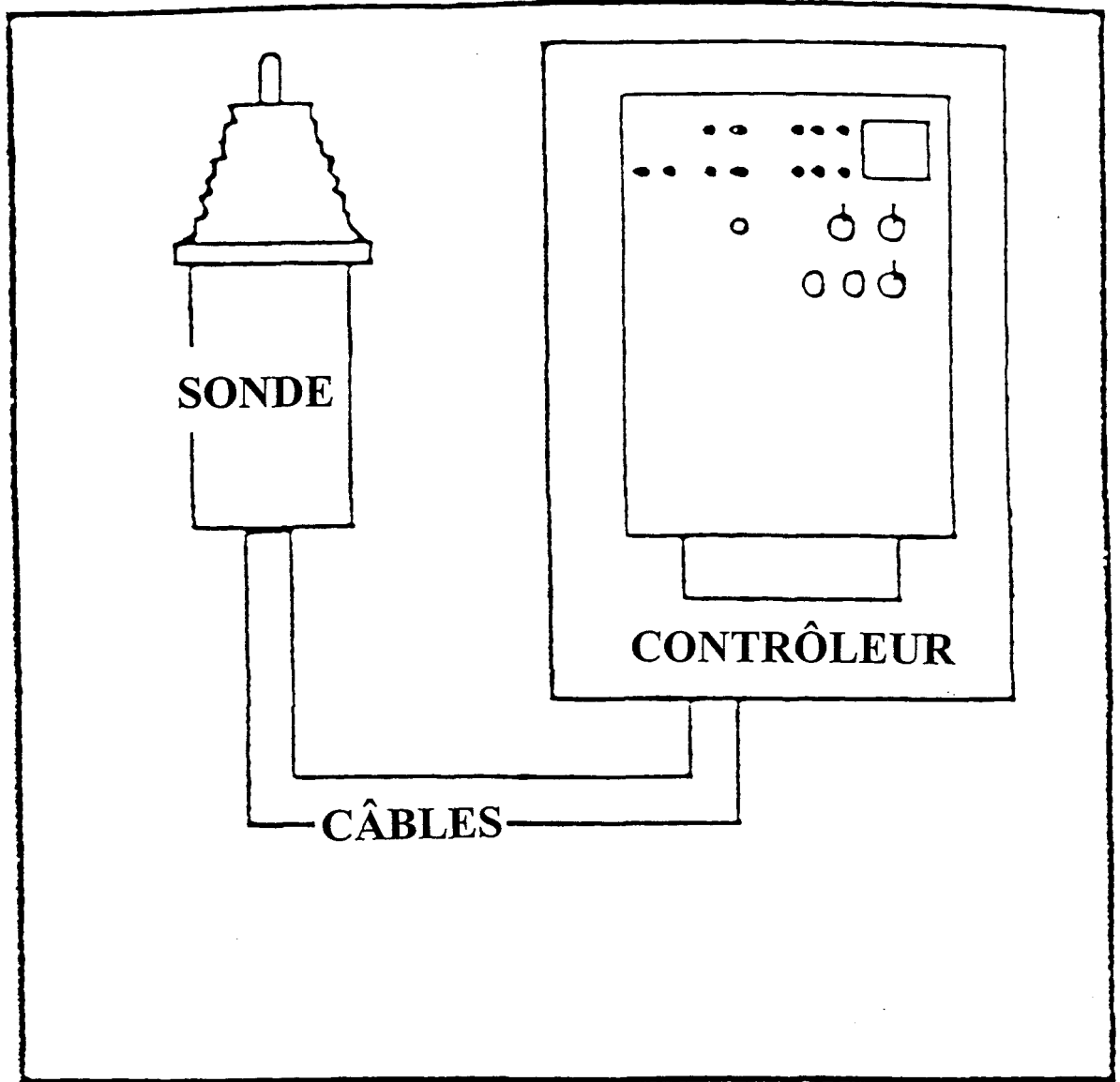


Figure 5 : Schéma technique du nivomètre

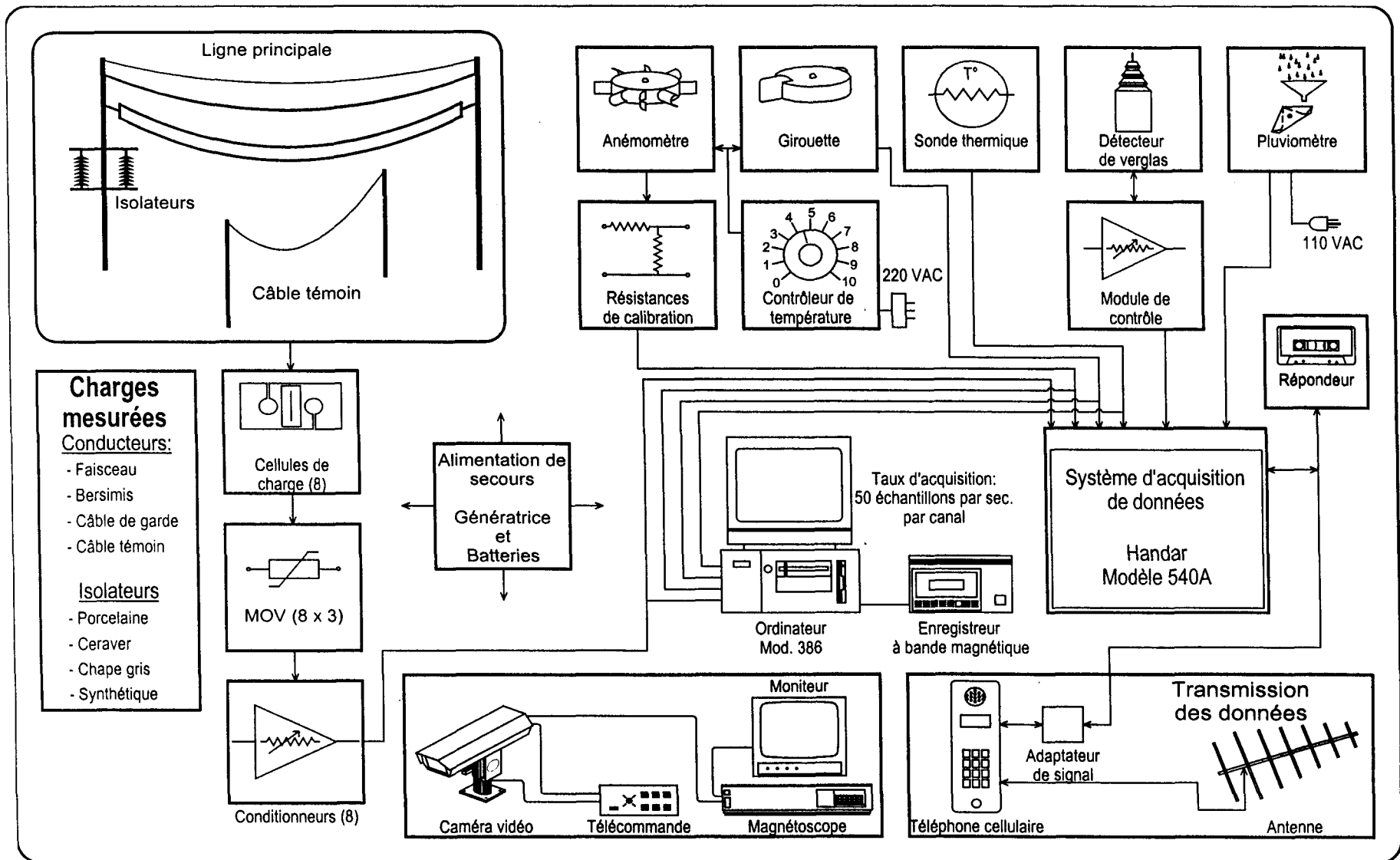


Figure 6 : Instrumentation de la station du Mont Valin

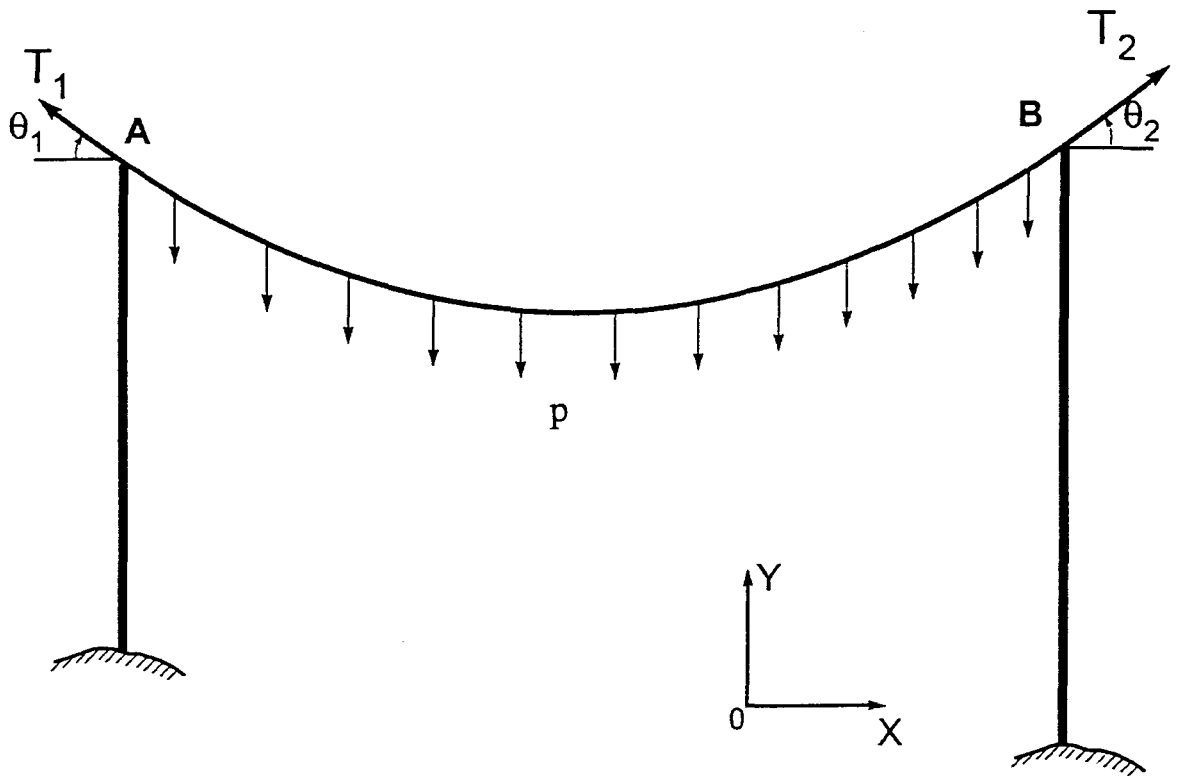


Figure 7 : Câble soumis aux tensions mécaniques et au poids de la glace

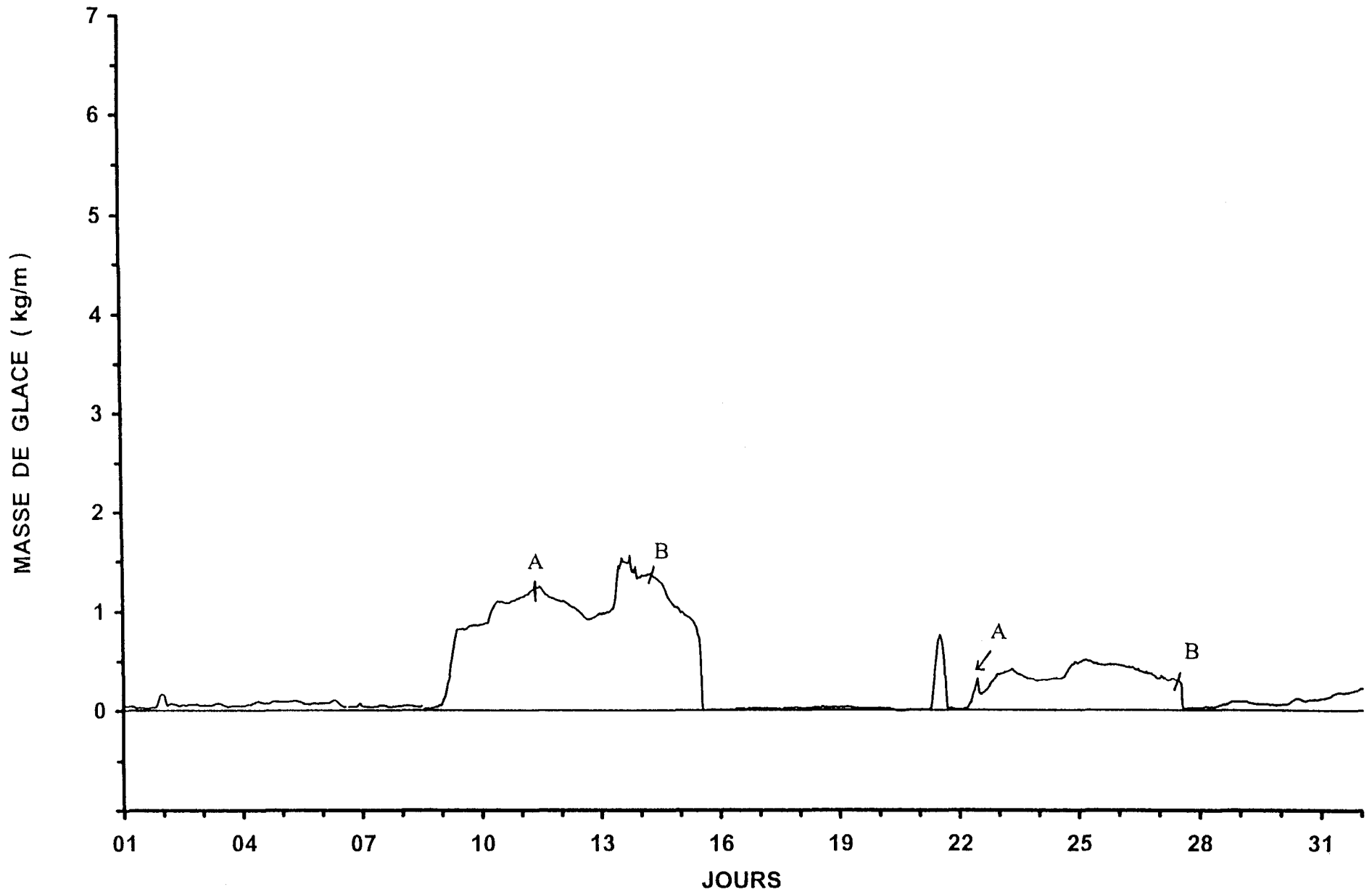


Figure 8 : Deux événements comprenant les trois phases successives (câble Bersimis, octobre 1993)

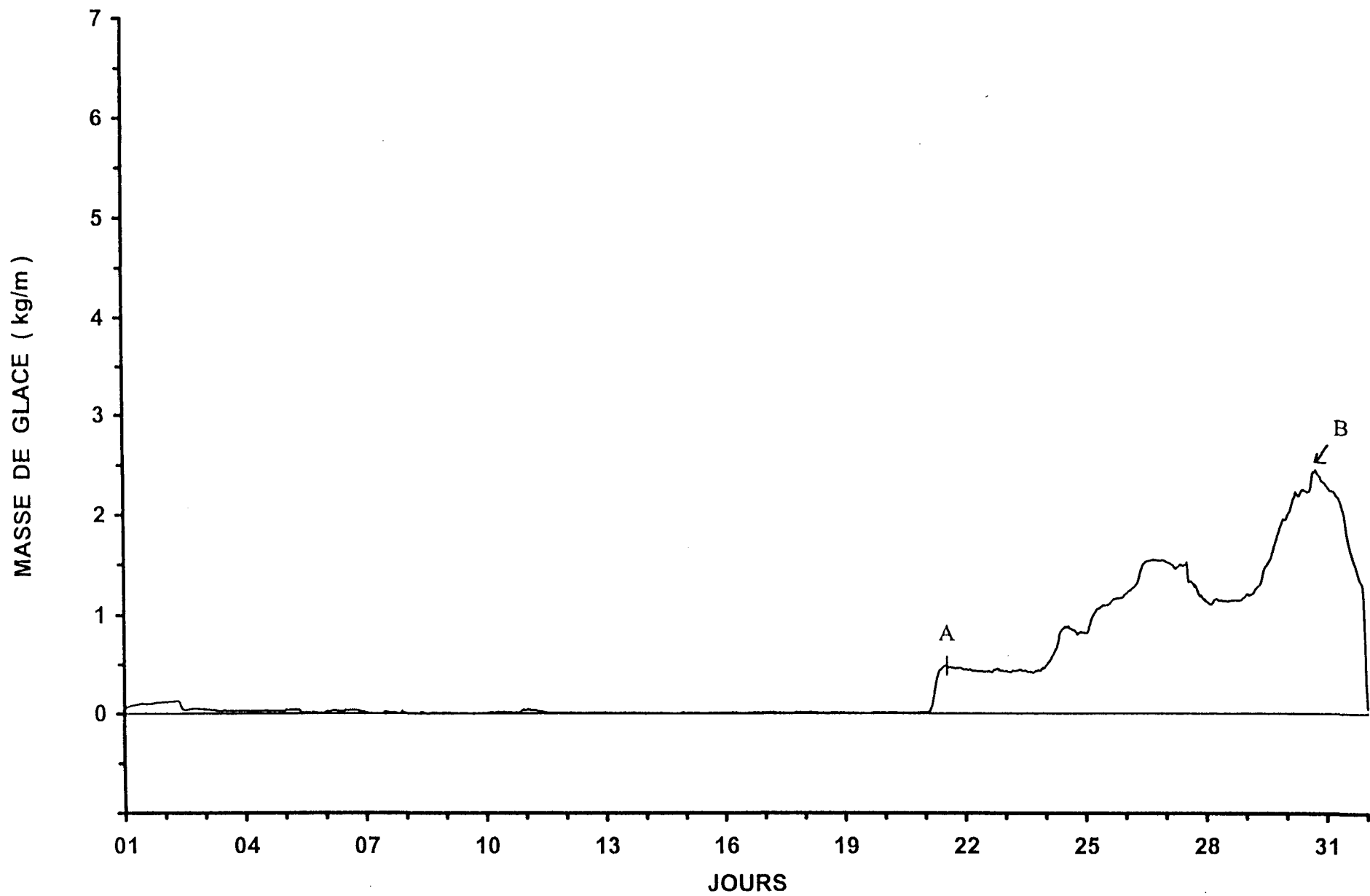


Figure 9 : Événement comprenant les trois phases successives (câble de garde, octobre 1997)

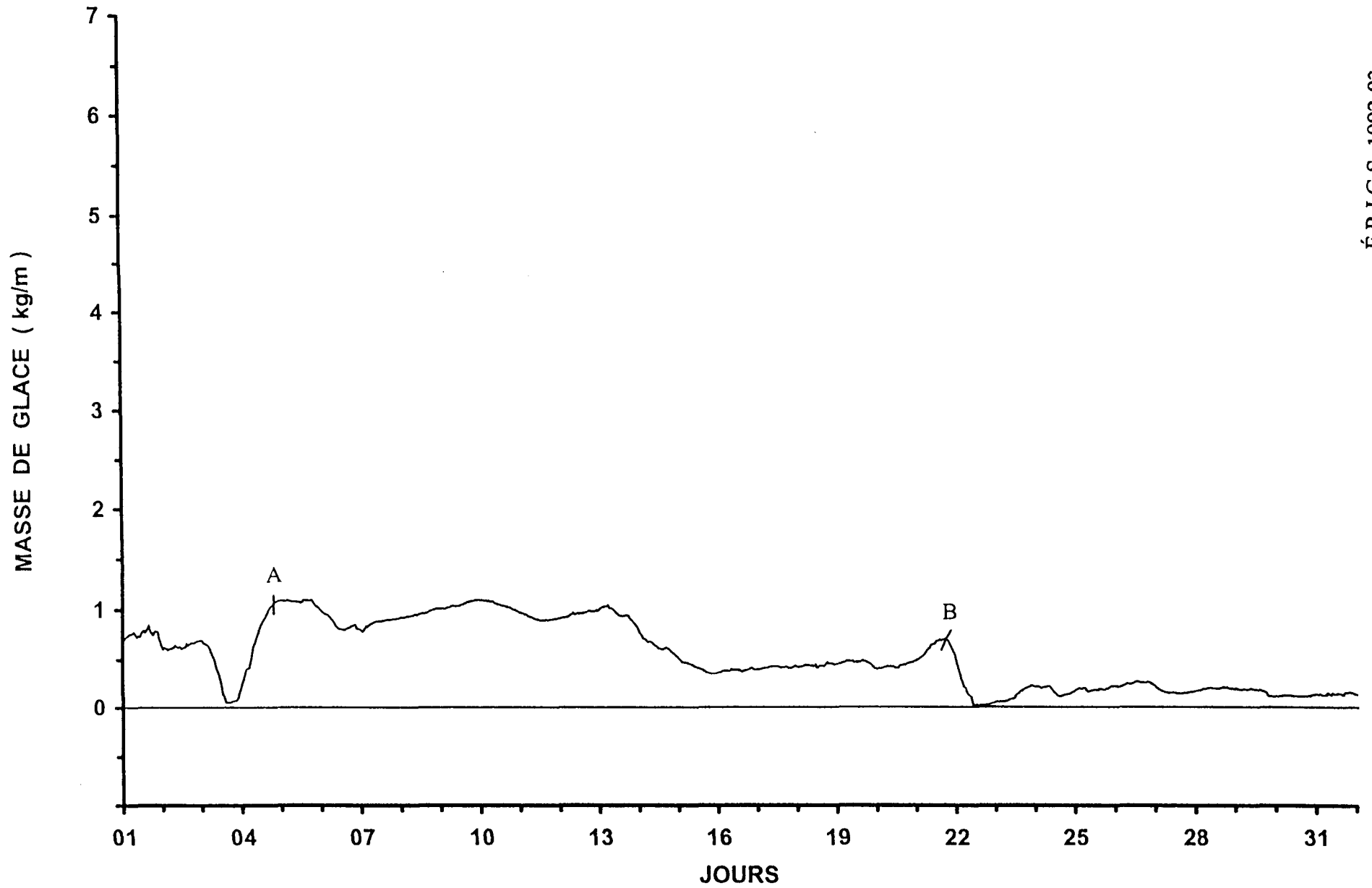


Figure 10 : Événement comprenant les trois phases successives (câble Bersimis, janvier 1993)

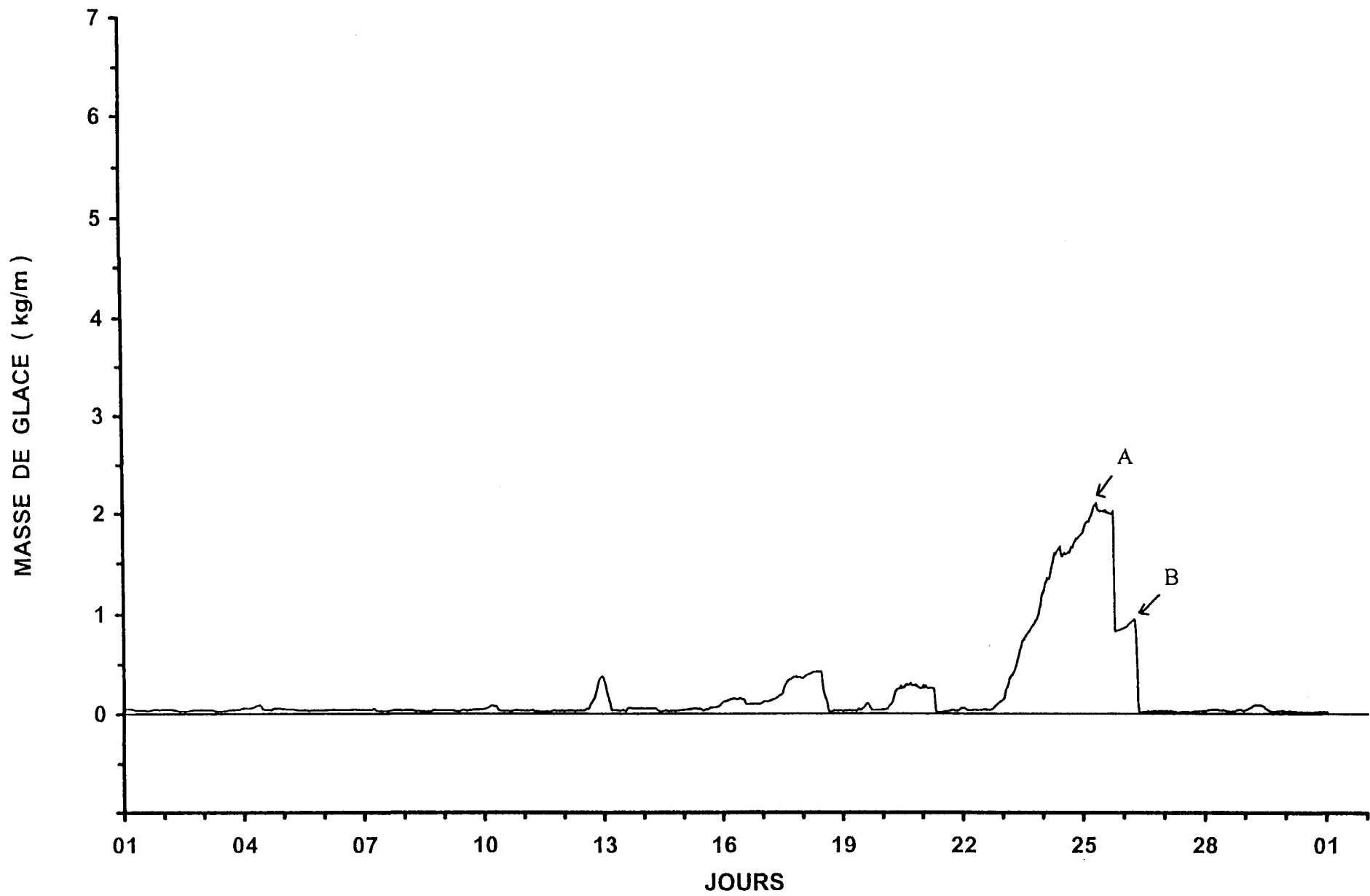


Figure 11 : Événement comprenant les trois phases successives (câble de garde, avril 1995)

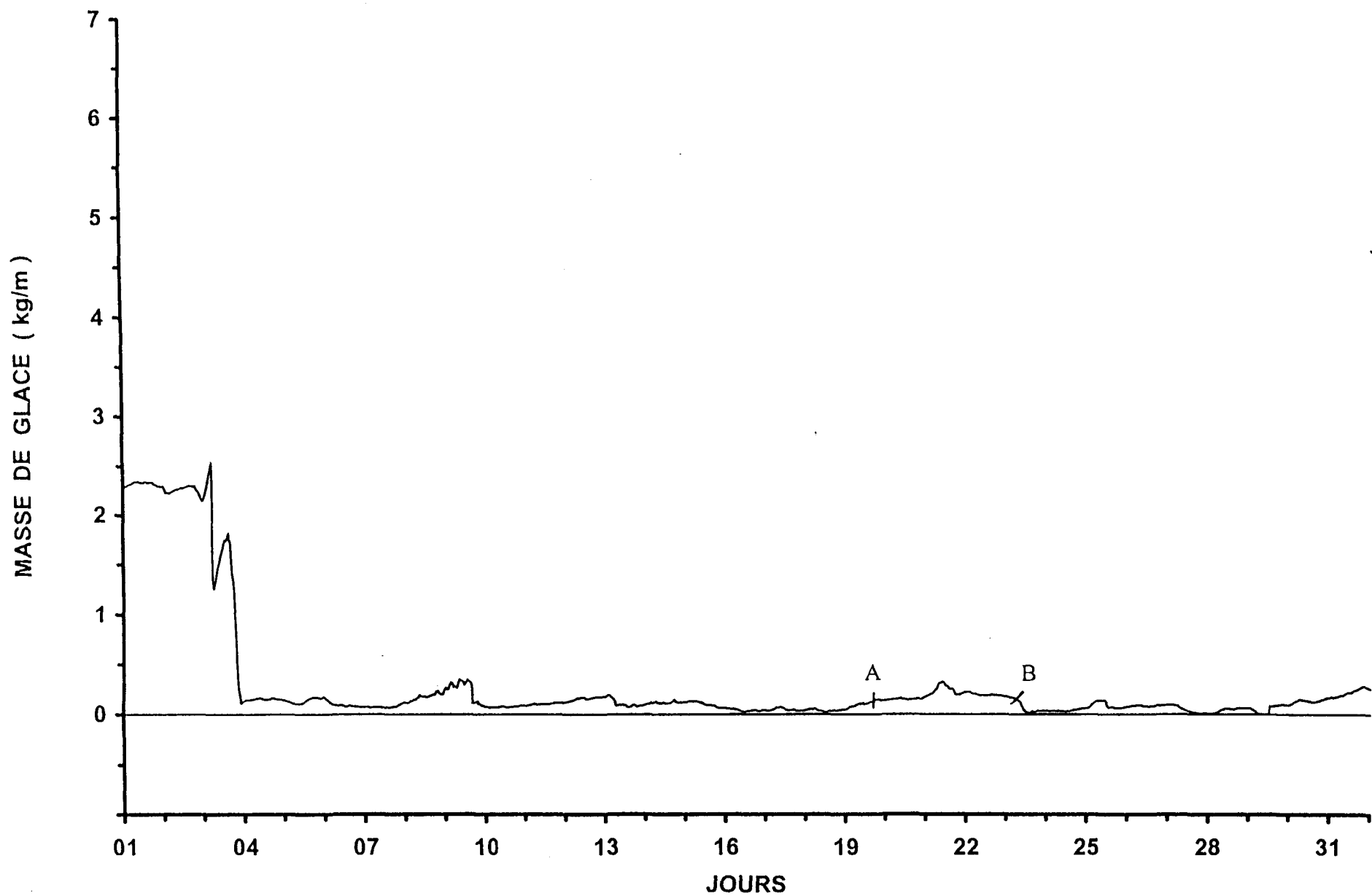
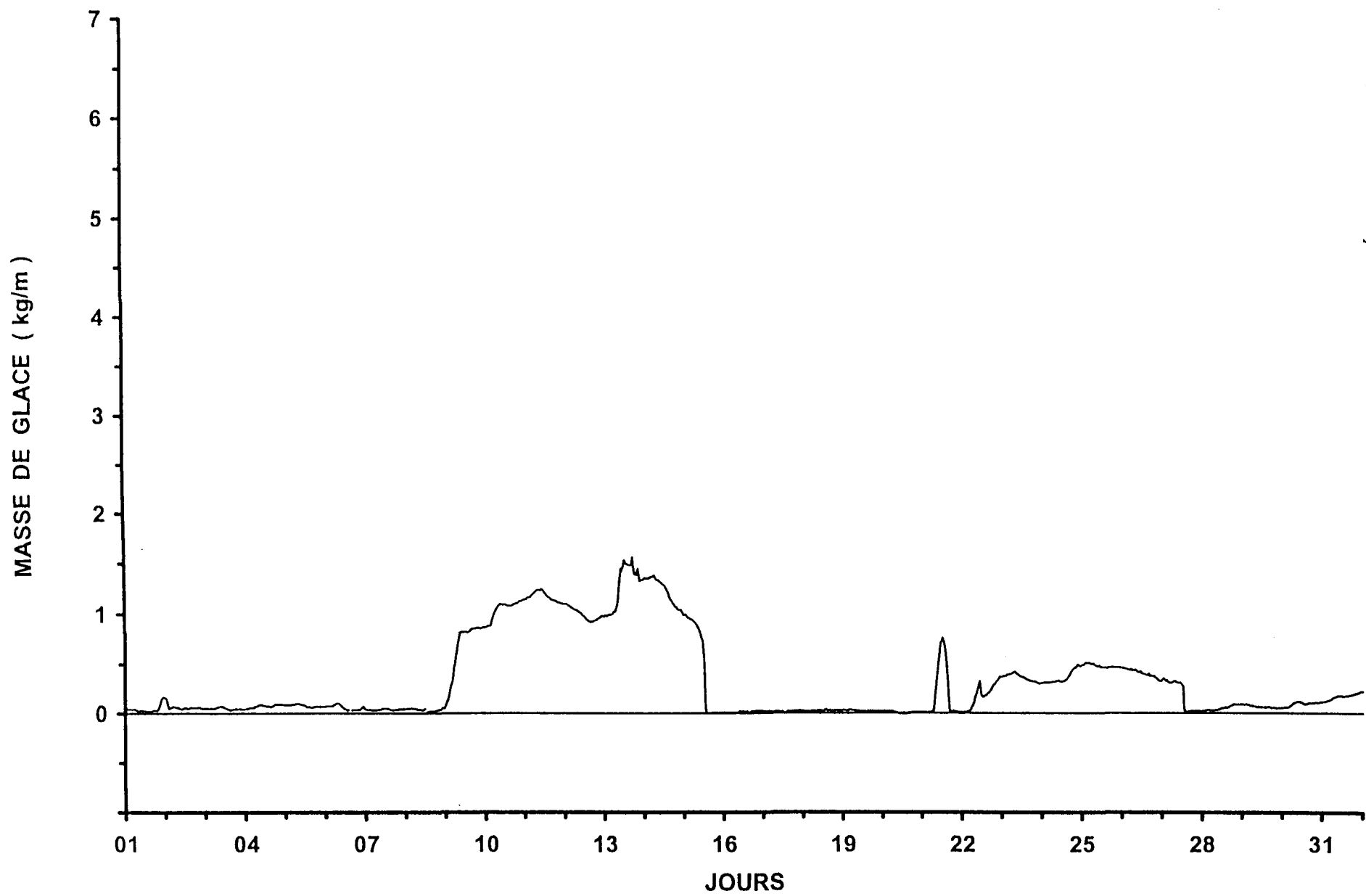


Figure 12 : Événement comprenant les trois phases successives (câble Bersimis, janvier 1998)



É.R.I.G.S. 1993-94

Figure 13 : Événement de verglas, le 21 octobre 1993 (câble Bersimis)

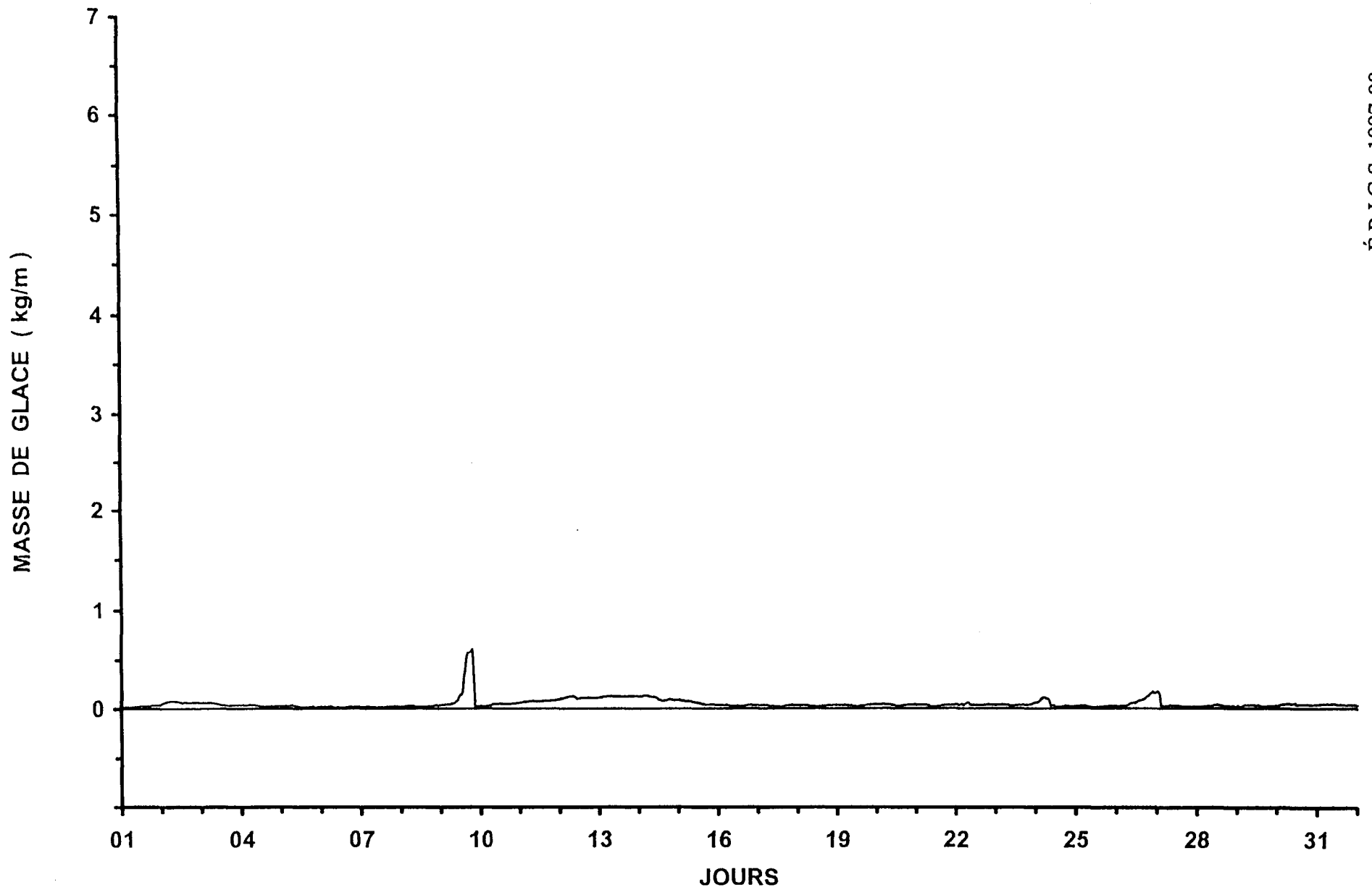


Figure 14 : Événement de verglas, le 9 mars 1998 (câble de garde)

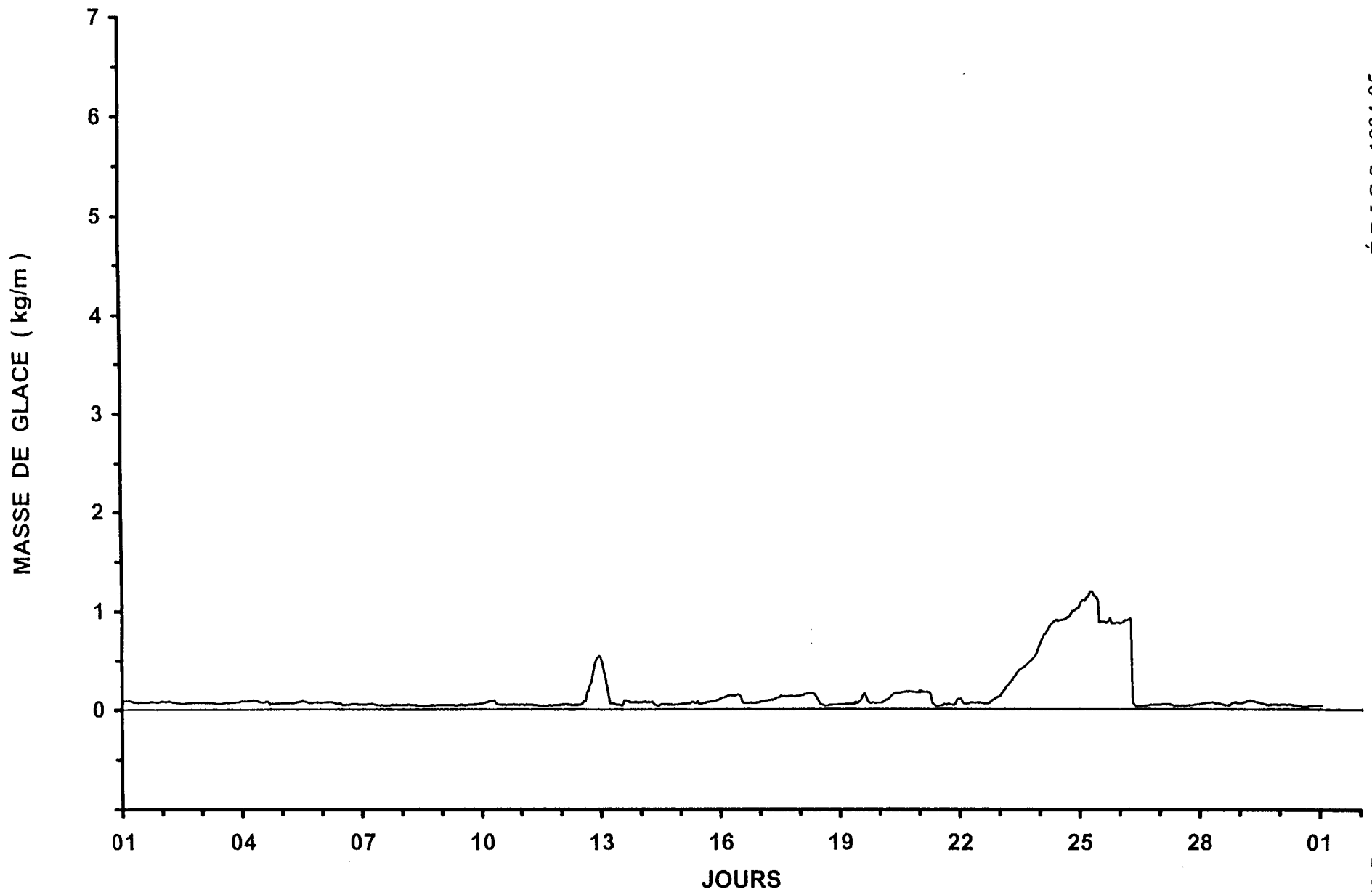


Figure 15 : Événement de verglas, le 12 avril 1995 (un câble du faisceau)

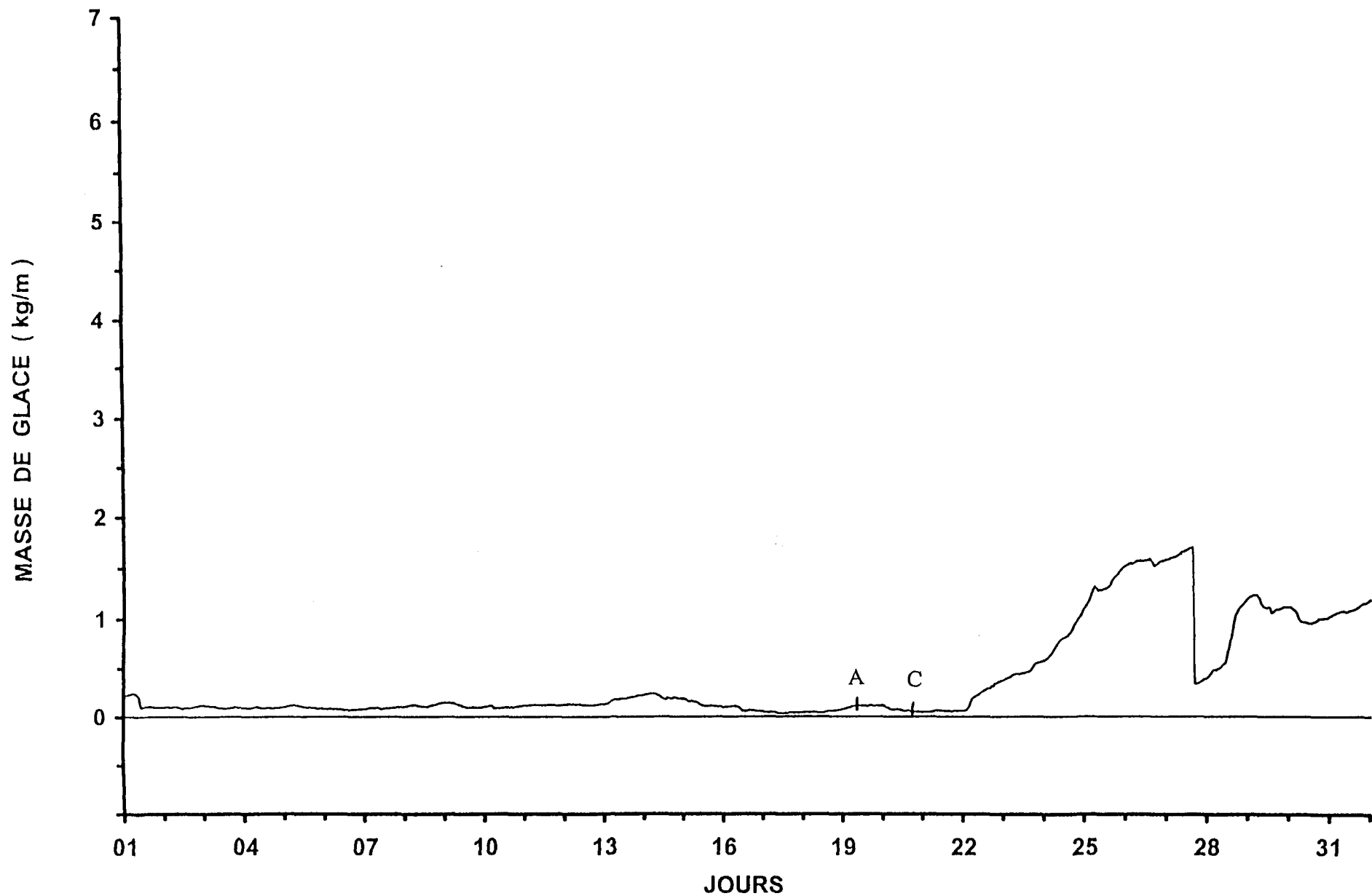


Figure 16 : Événement sans phase de délestage (câble Bersimis, décembre 1995)

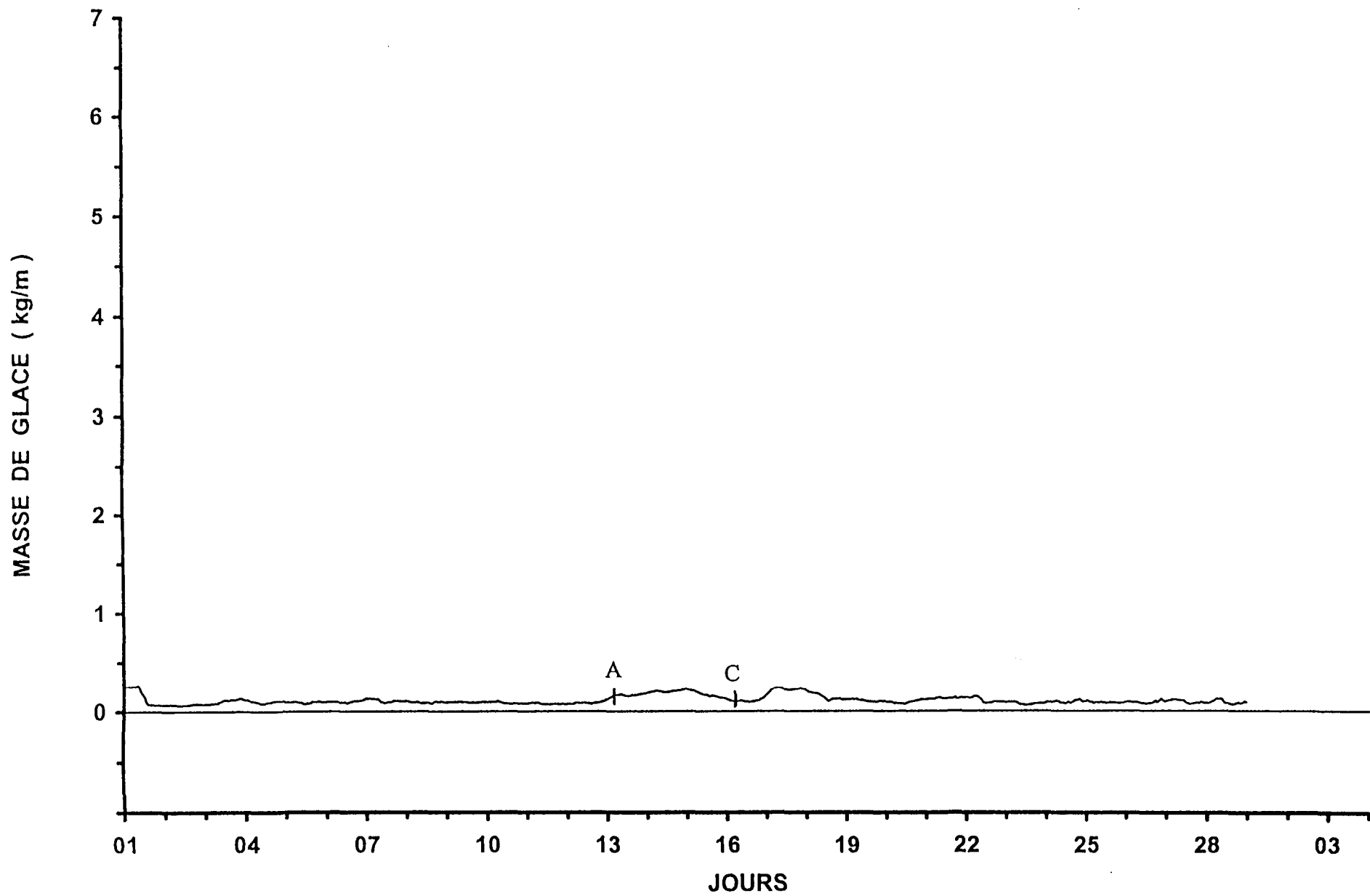
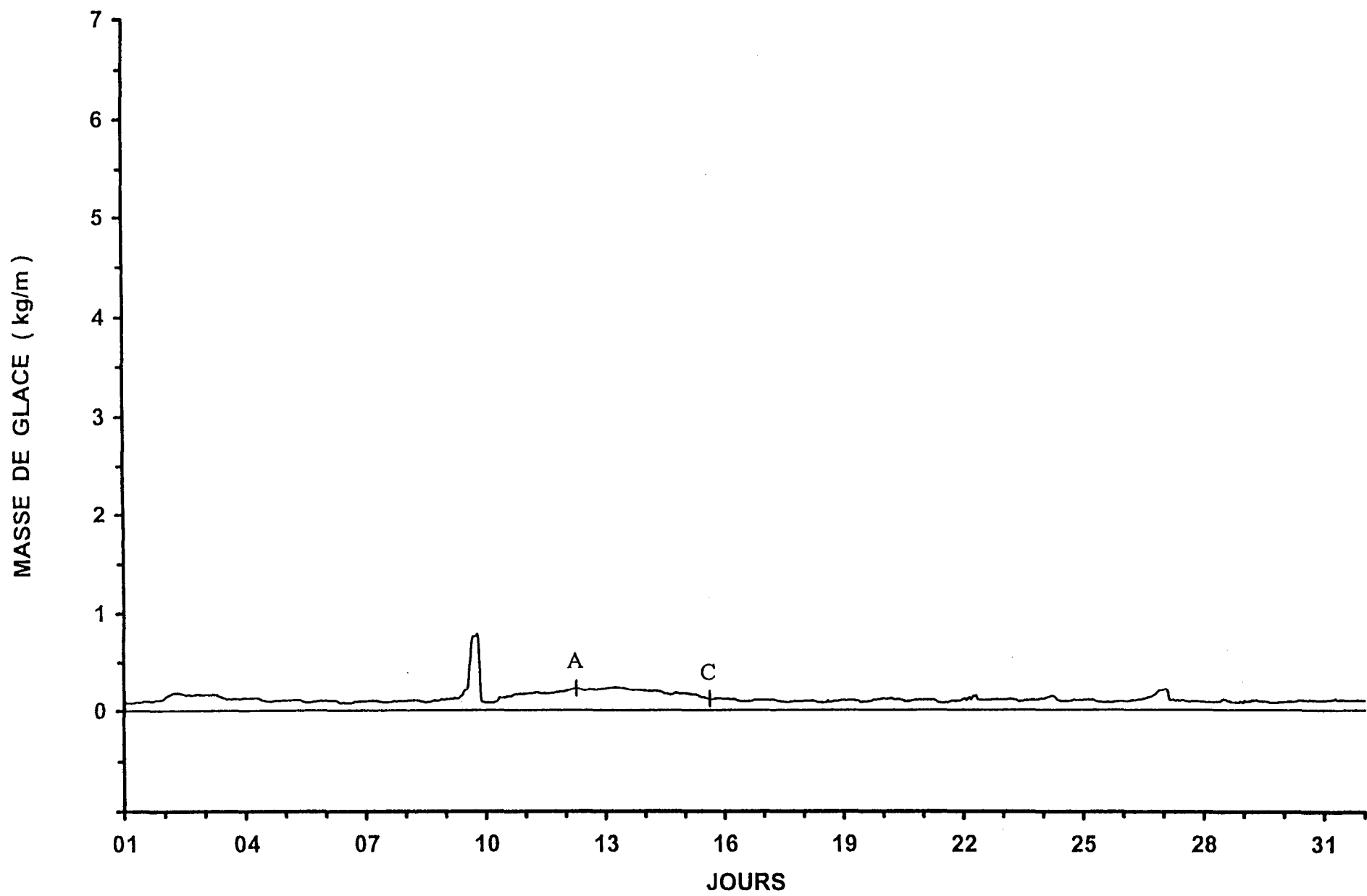


Figure 17 : Événement sans phase de délestage (câble Bersimis, février 1998)



É.R.I.G.S. 1997-98

Figure 18 : Événement sans phase de délestage (câble Bersimis, mars 1998)

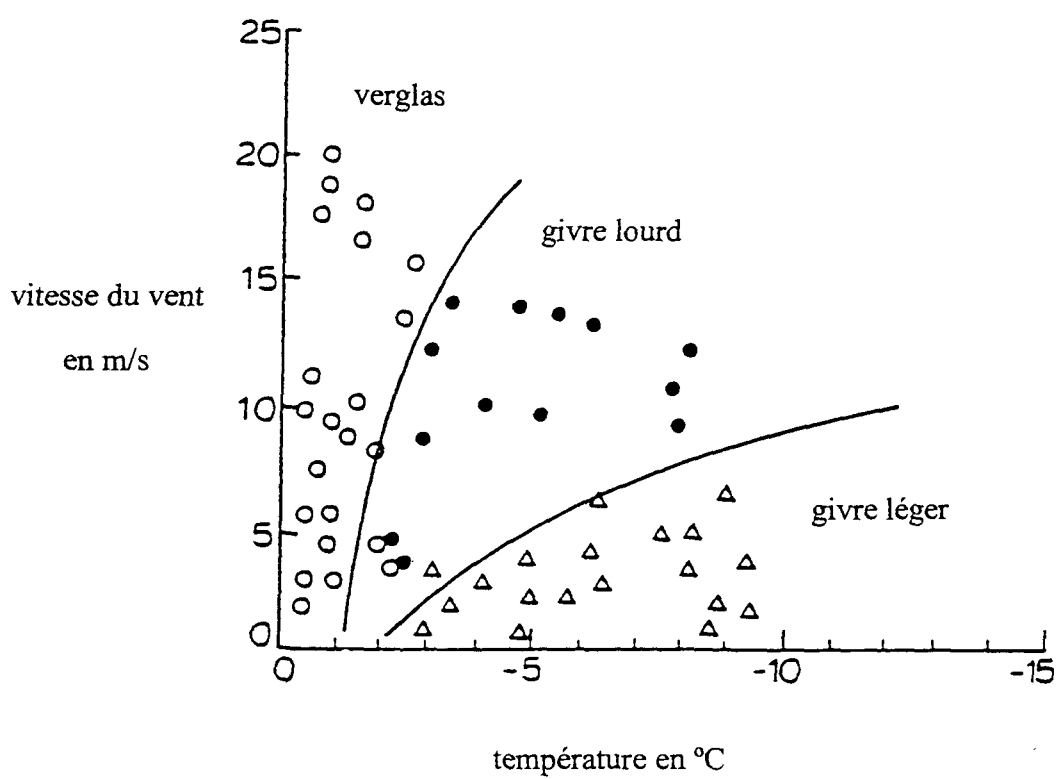


Figure 19 : Relation entre les types de glace et les conditions météorologiques de formation

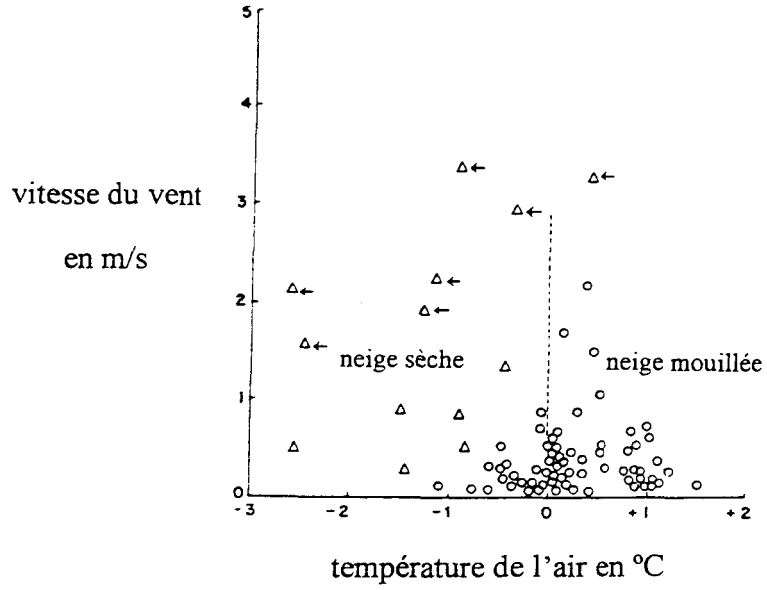


Figure 20 : Conditions météorologiques de l'accrétion de neige sur un câble

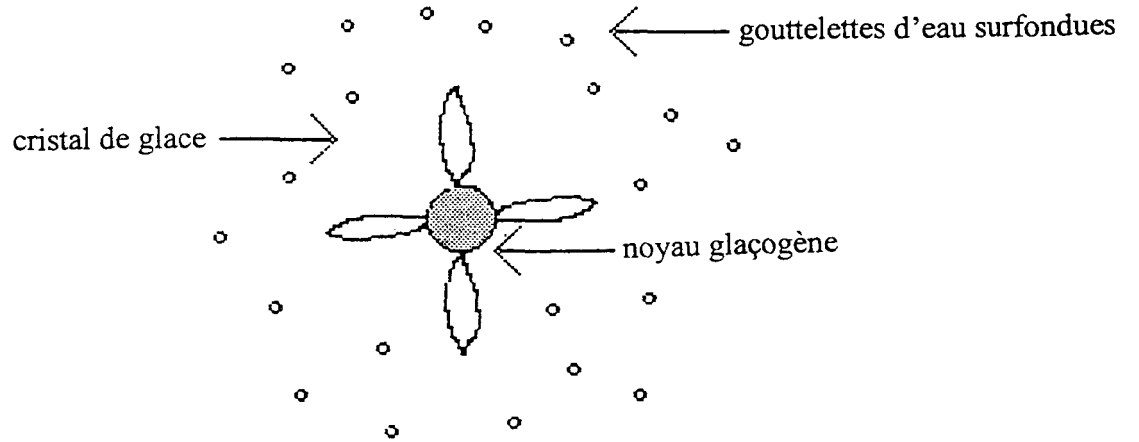
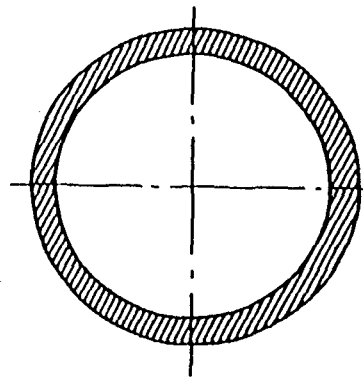


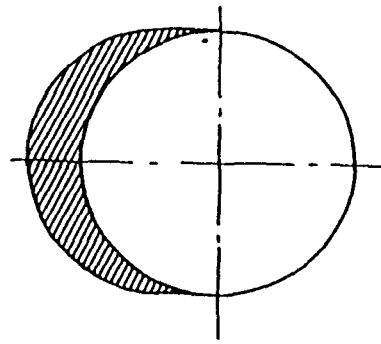
Figure 21 : Cristal de glace entouré de gouttelettes d'eau surfondues

rigidité en torsion faible

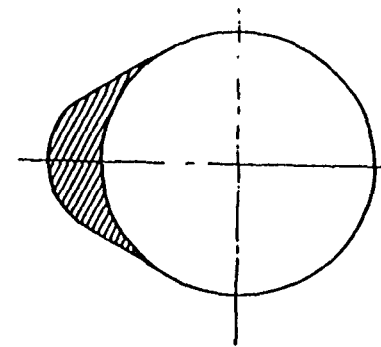
rigidité en torsion plus élevée



en rotation



stationnaire



stationnaire

efficacité de collecte maximum

efficacité de collecte typique

Figure 22 : Effet de la rigidité en torsion sur la forme du dépôt de glace

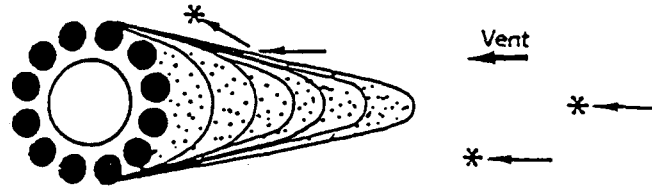


Figure 23 : Accrétion axiale de neige mouillée sur un conducteur toronné à forte rigidité en torsion

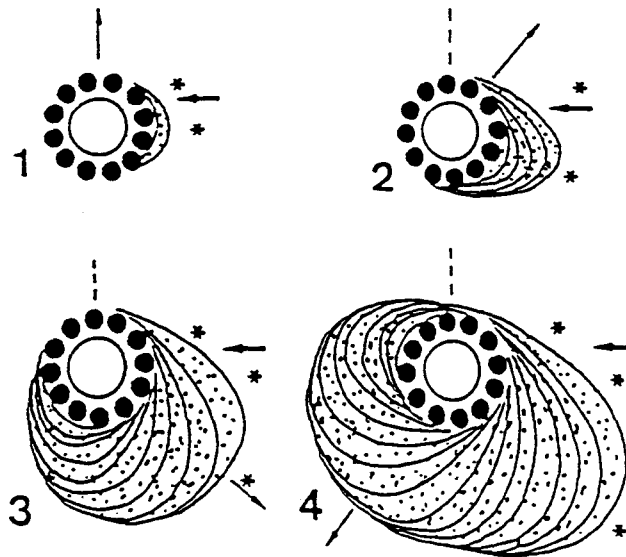


Figure 24 : Accrétion cylindrique de neige mouillée sur un conducteur toronné à faible rigidité en torsion

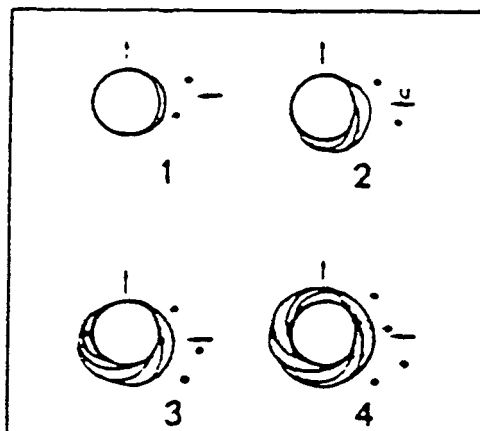
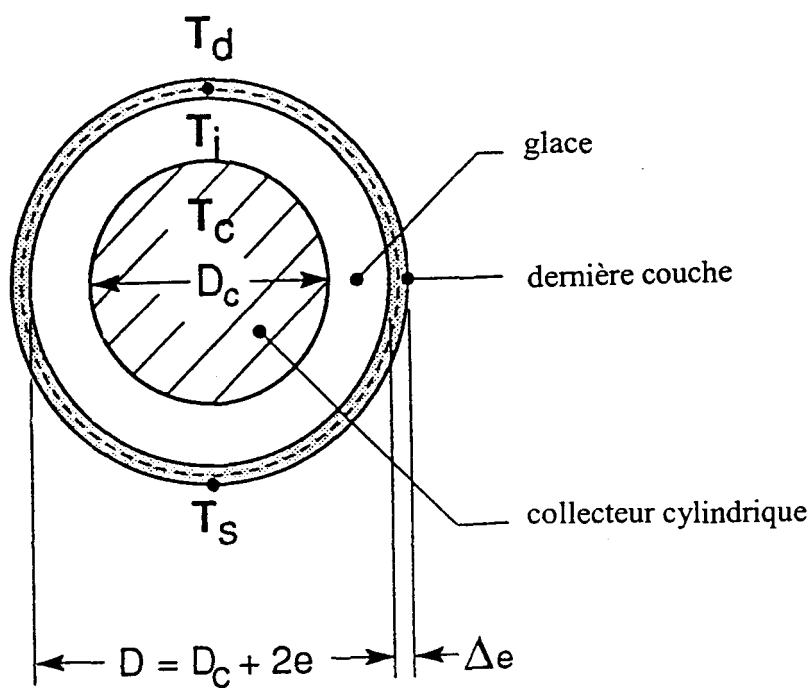


Figure 25 : Glissement et rotation de neige mouillée sur un conducteur lisse



Δe = variation d'épaisseur de la dernière couche

Figure 26 : Dépôt de glace sur un conducteur cylindrique tournant

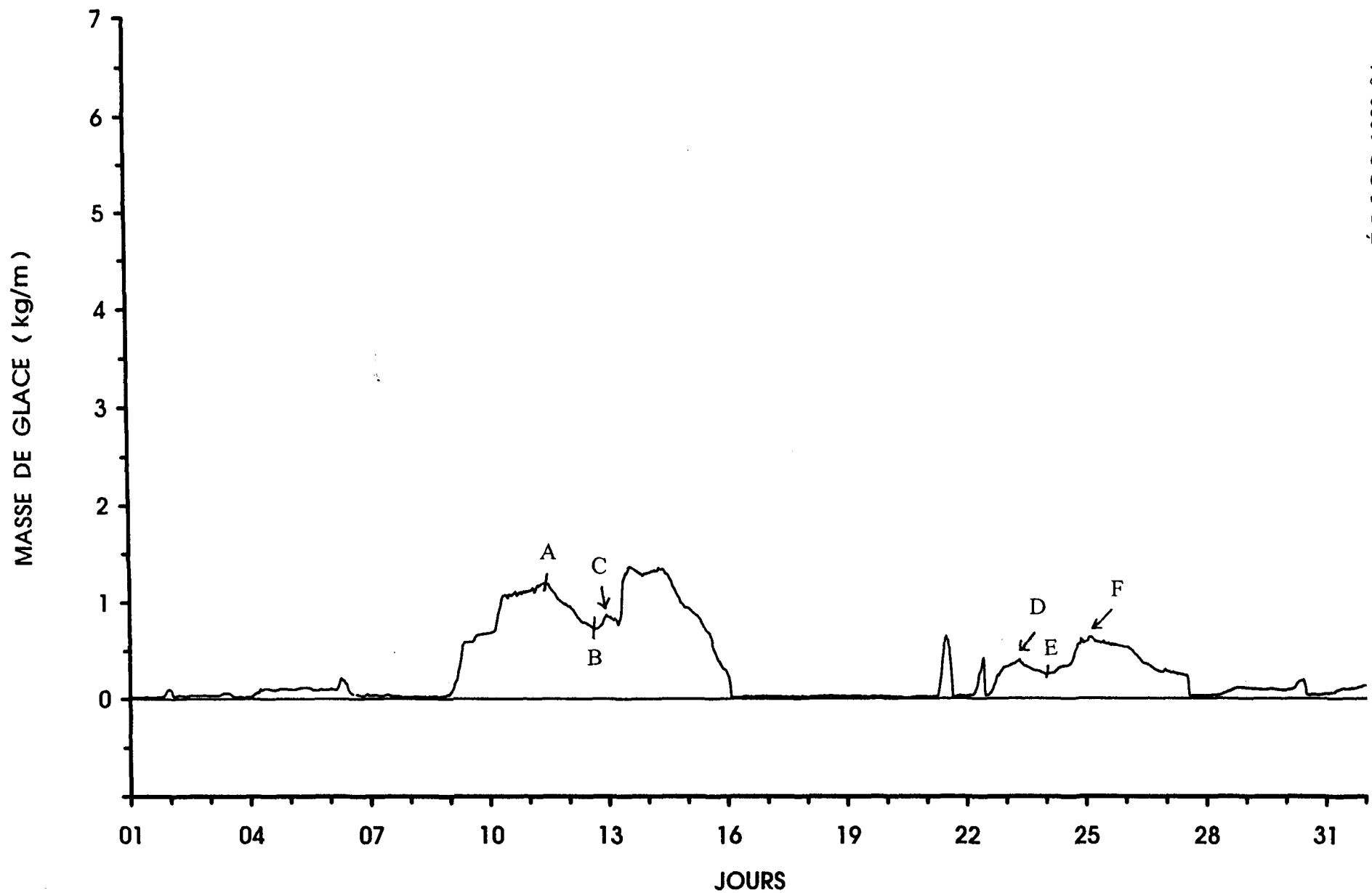


Figure 27 : Identification du début de la phase de maintien (câble de garde, octobre 1993)

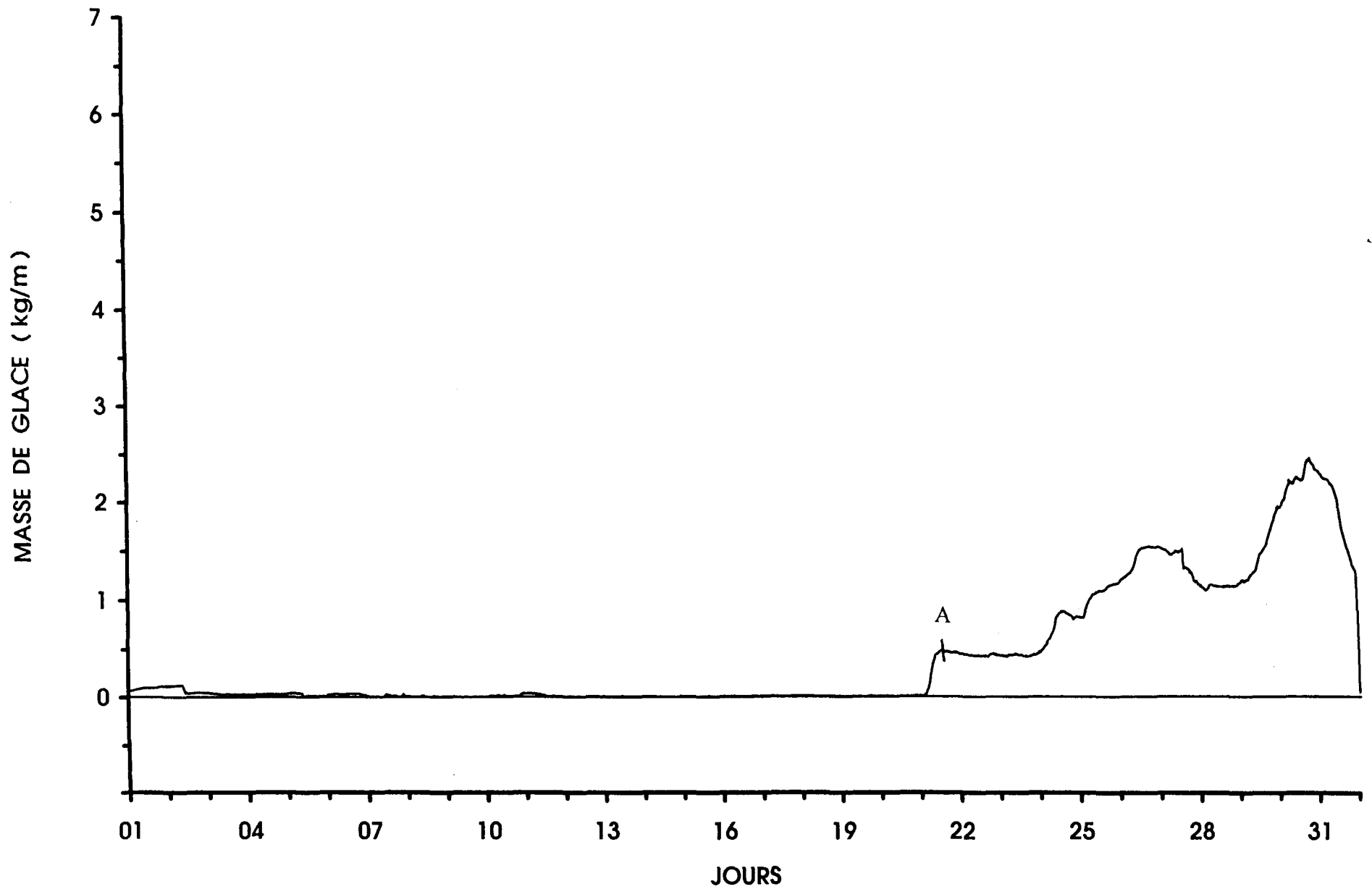


Figure 28 : Identification du début de la phase de maintien (câble de garde, octobre 1997)

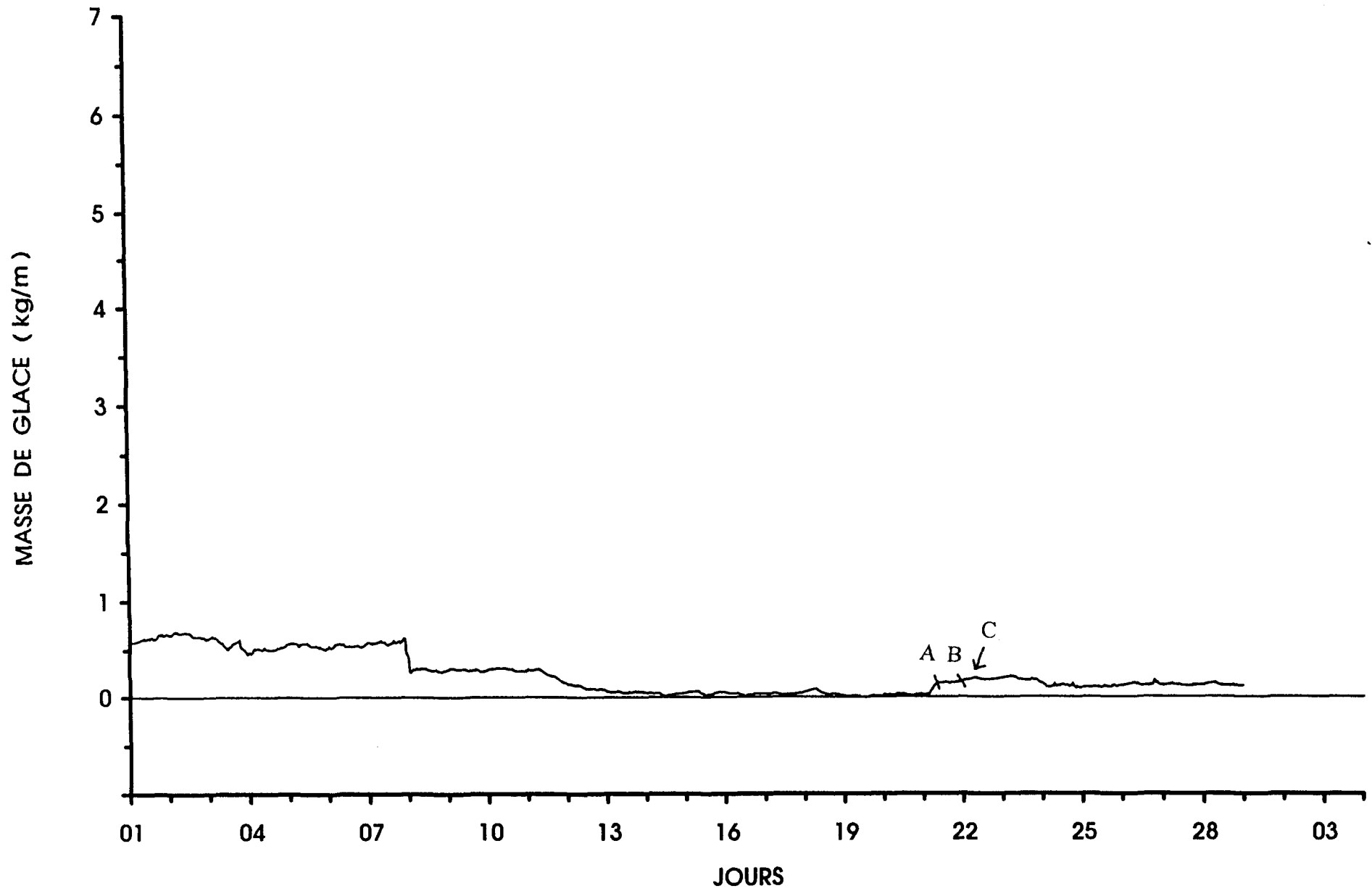


Figure 29 : Identification du début de la phase de maintien (câble Bersimis, février 1994)

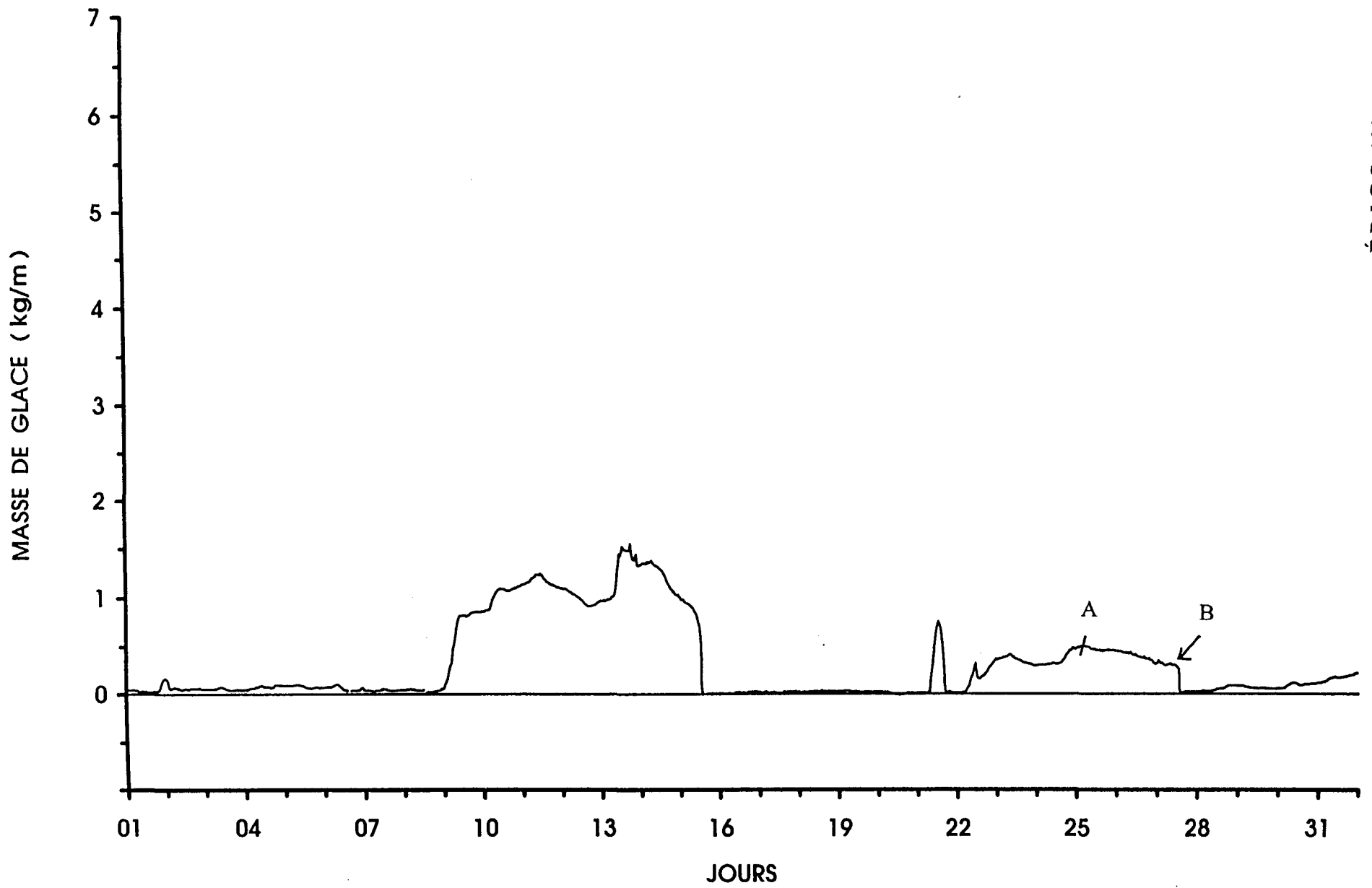


Figure 30 : Identification de la fin de la phase de maintien (câble Bersimis, octobre 1993)

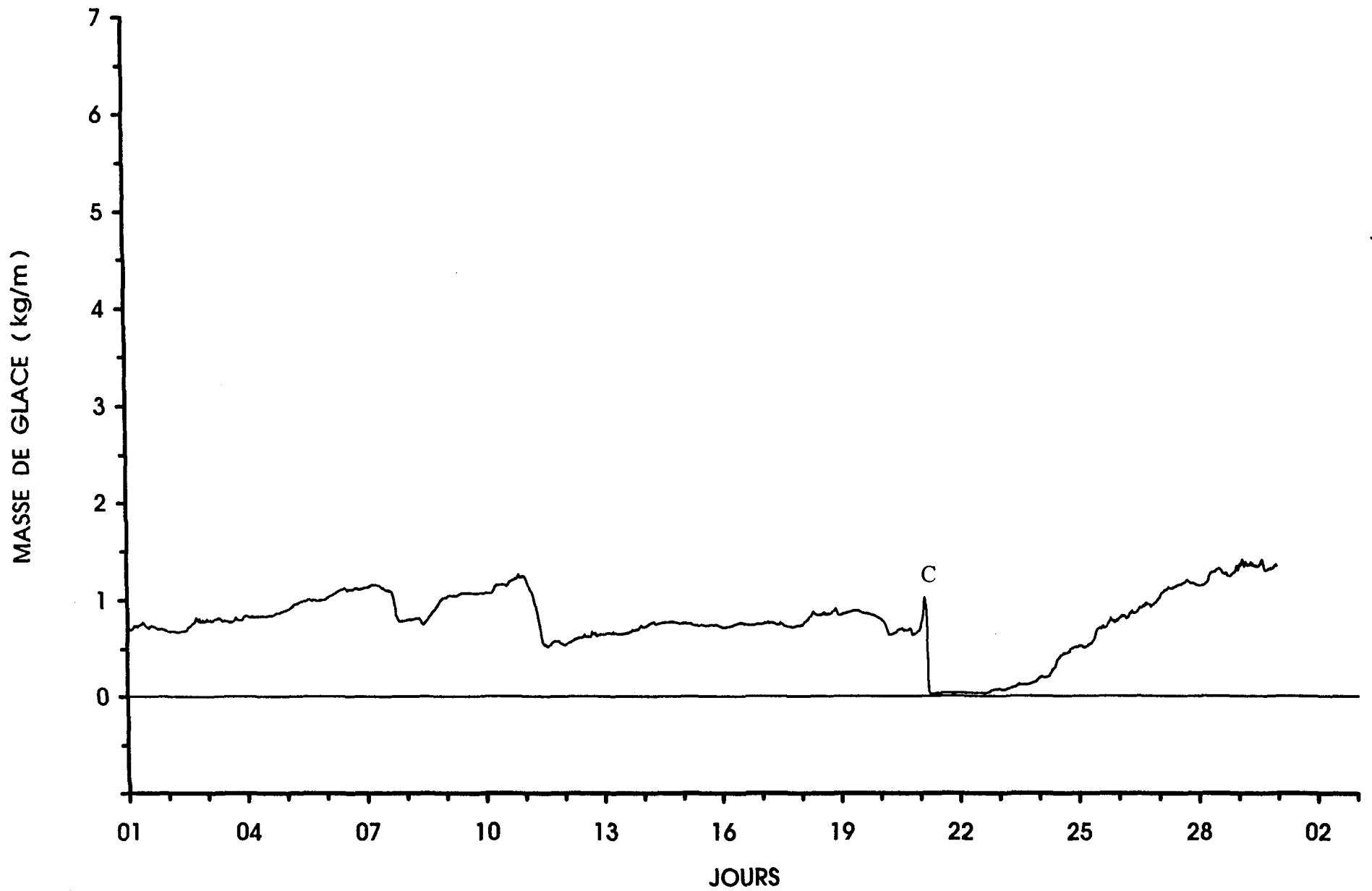


Figure 31 : Identification de la fin de la phase de maintien (câble de garde, février 1996)

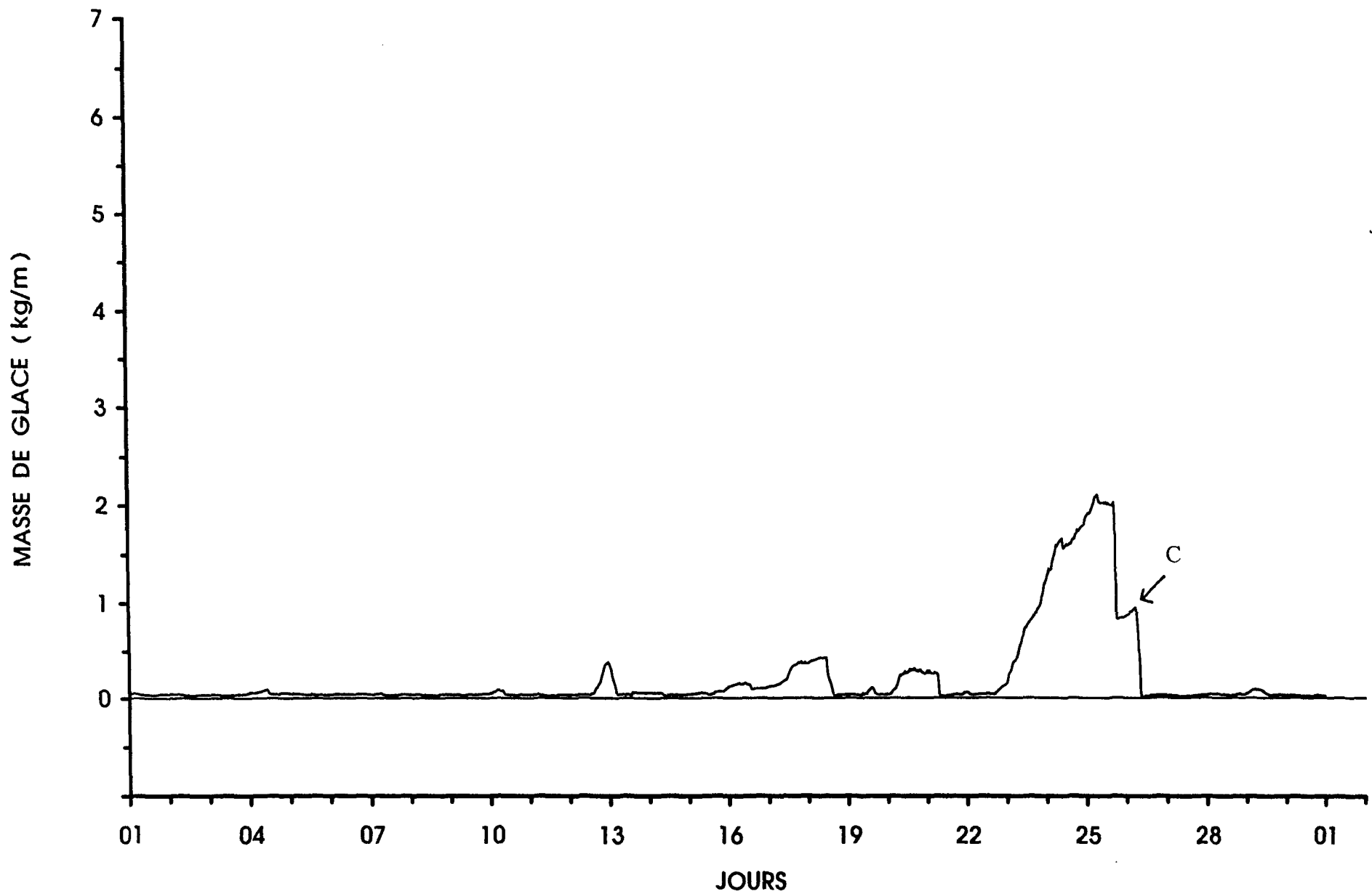


Figure 32 : Identification de la fin de la phase de maintien (câble de garde, avril 1995)

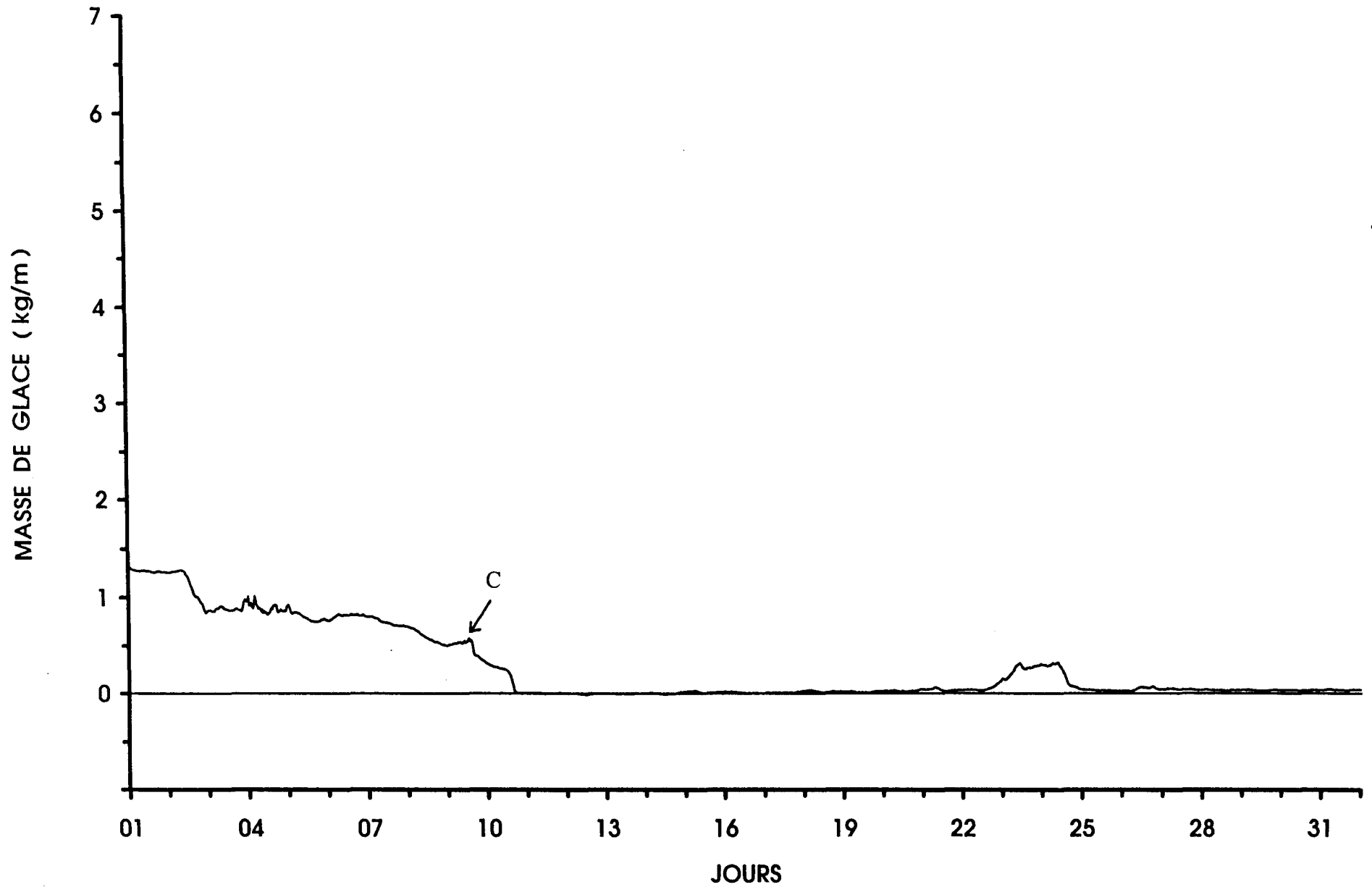


Figure 33 : Identification de la fin de la phase de maintien (câble de garde, mars 1996)

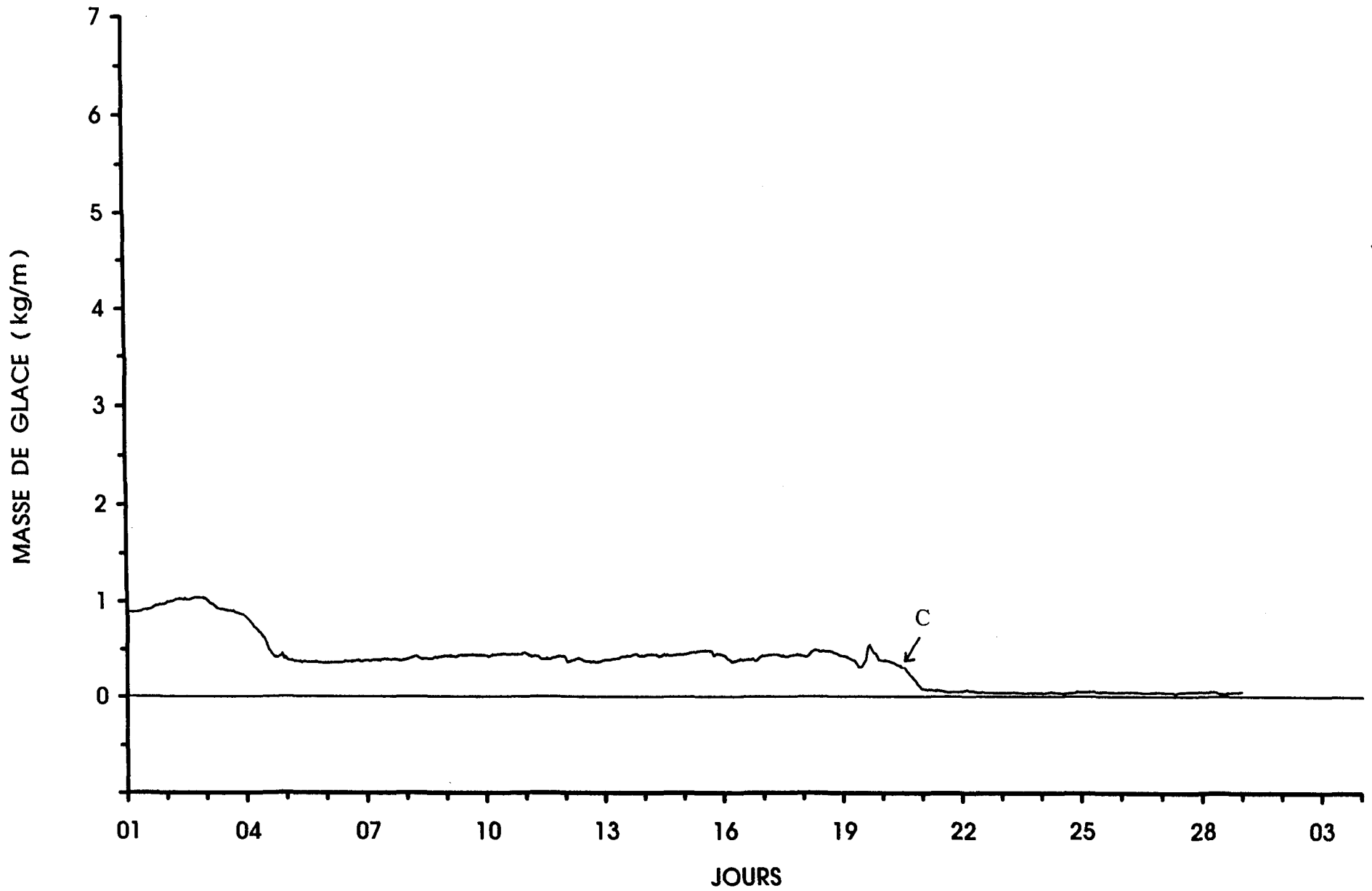


Figure 34 : Identification de la fin de la phase de maintien (câble de garde, février 1995)

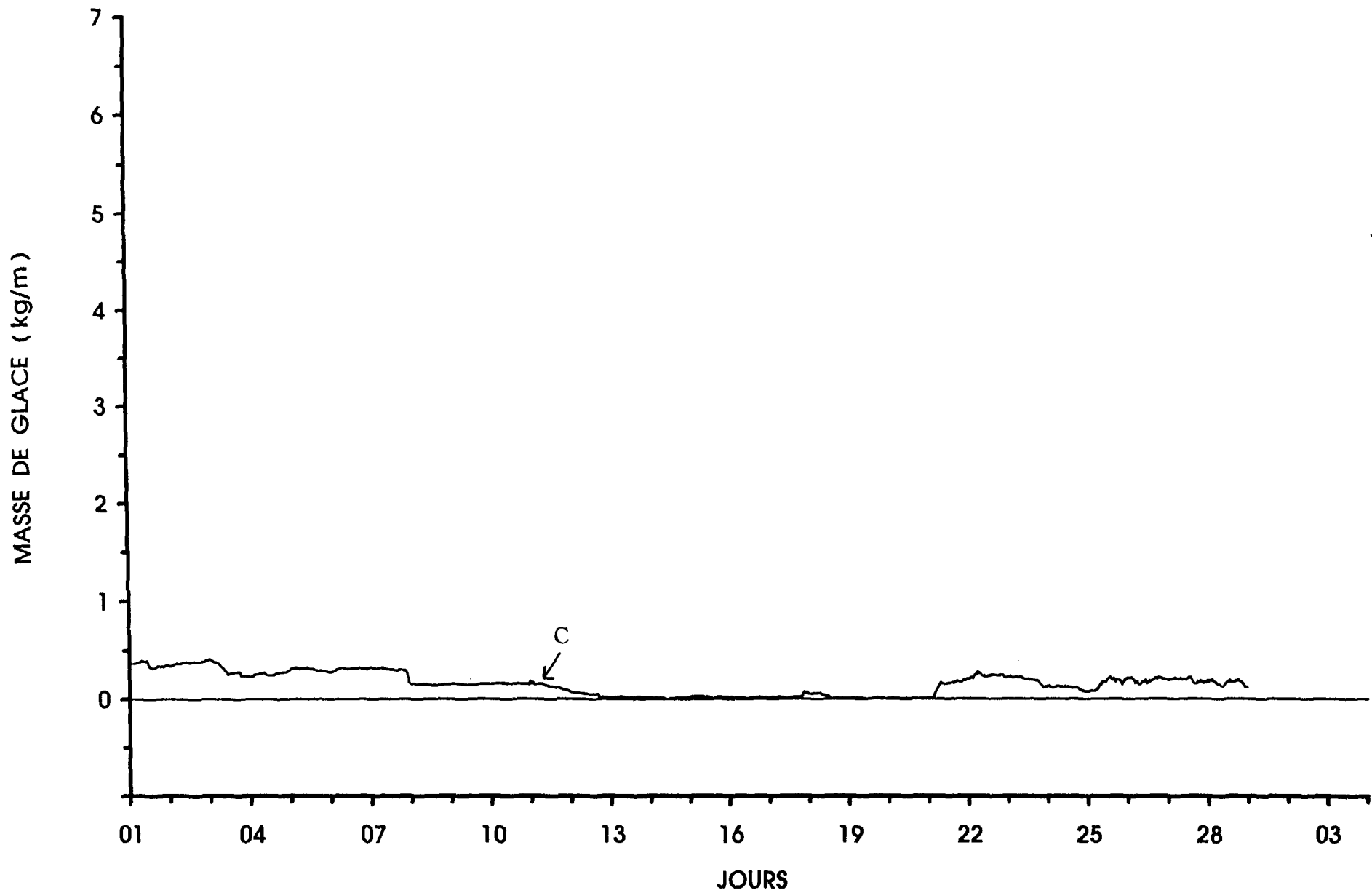


Figure 35 : Identification de la fin de la phase de maintien (câble de garde, février 1994)

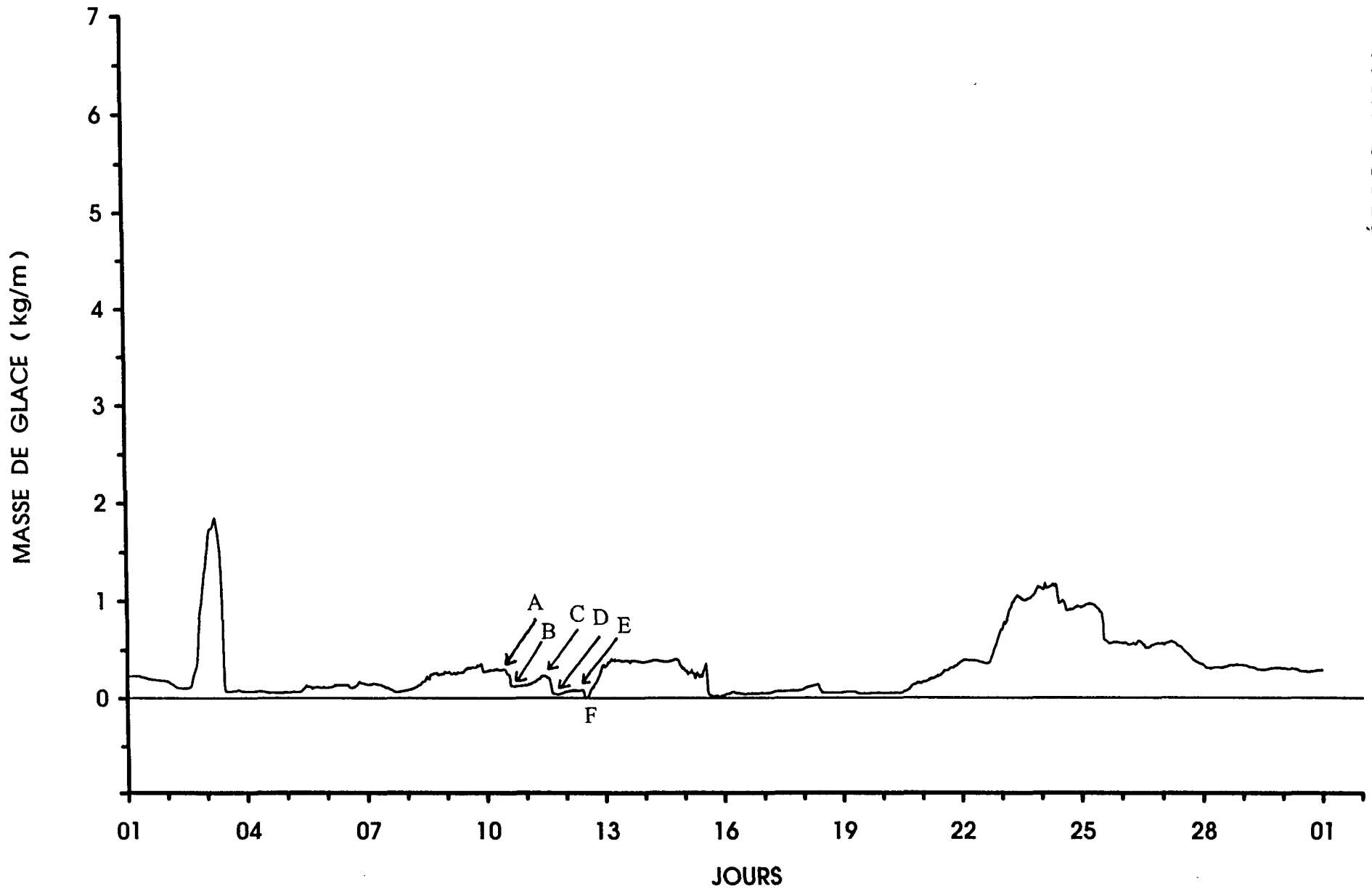


Figure 36 : Identification de la fin de la phase de maintien (câble de garde, novembre 1995)

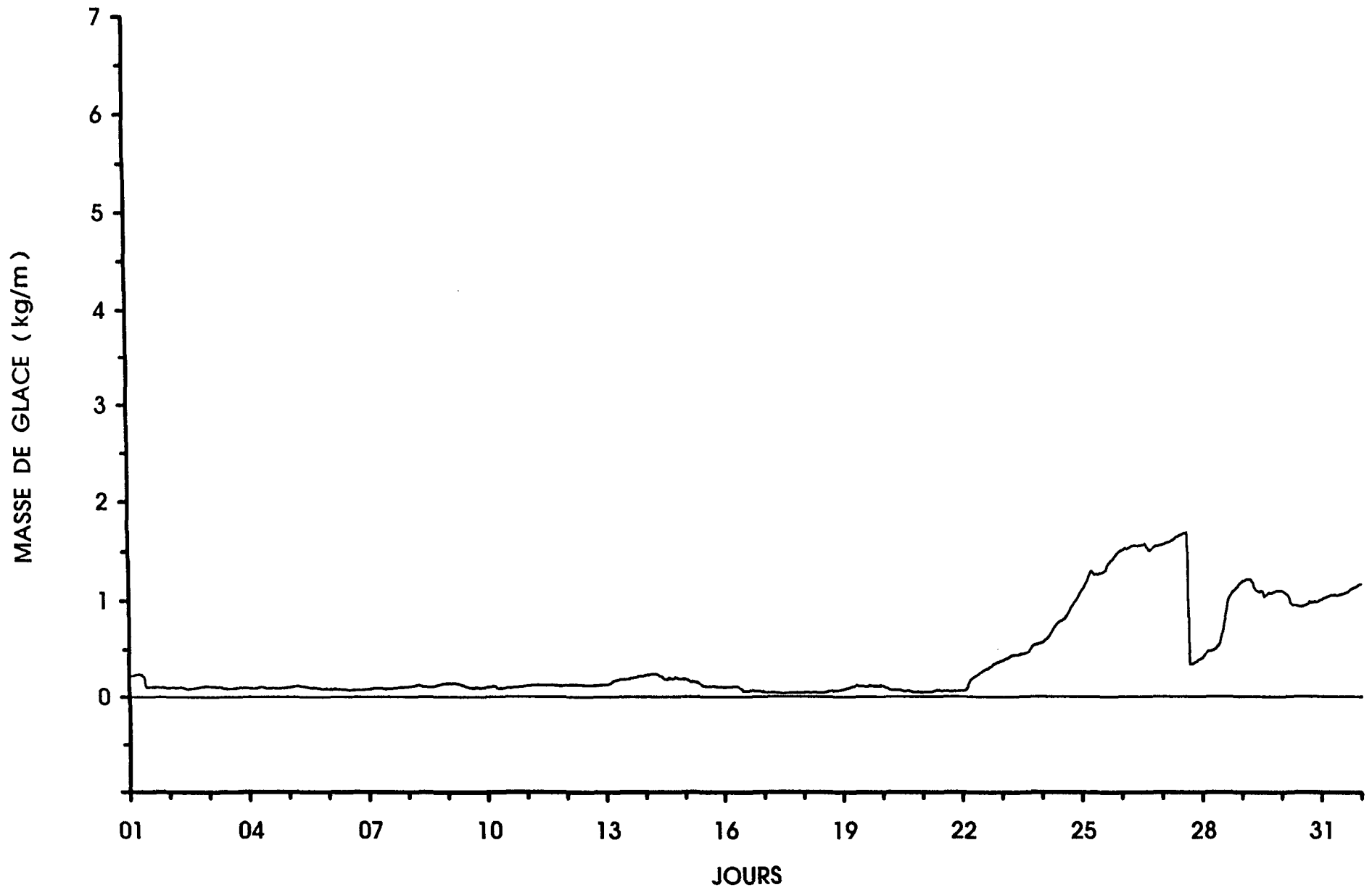


Figure 37 : Phase de maintien du 19 au 20 décembre 1995 (câble Bersimis)

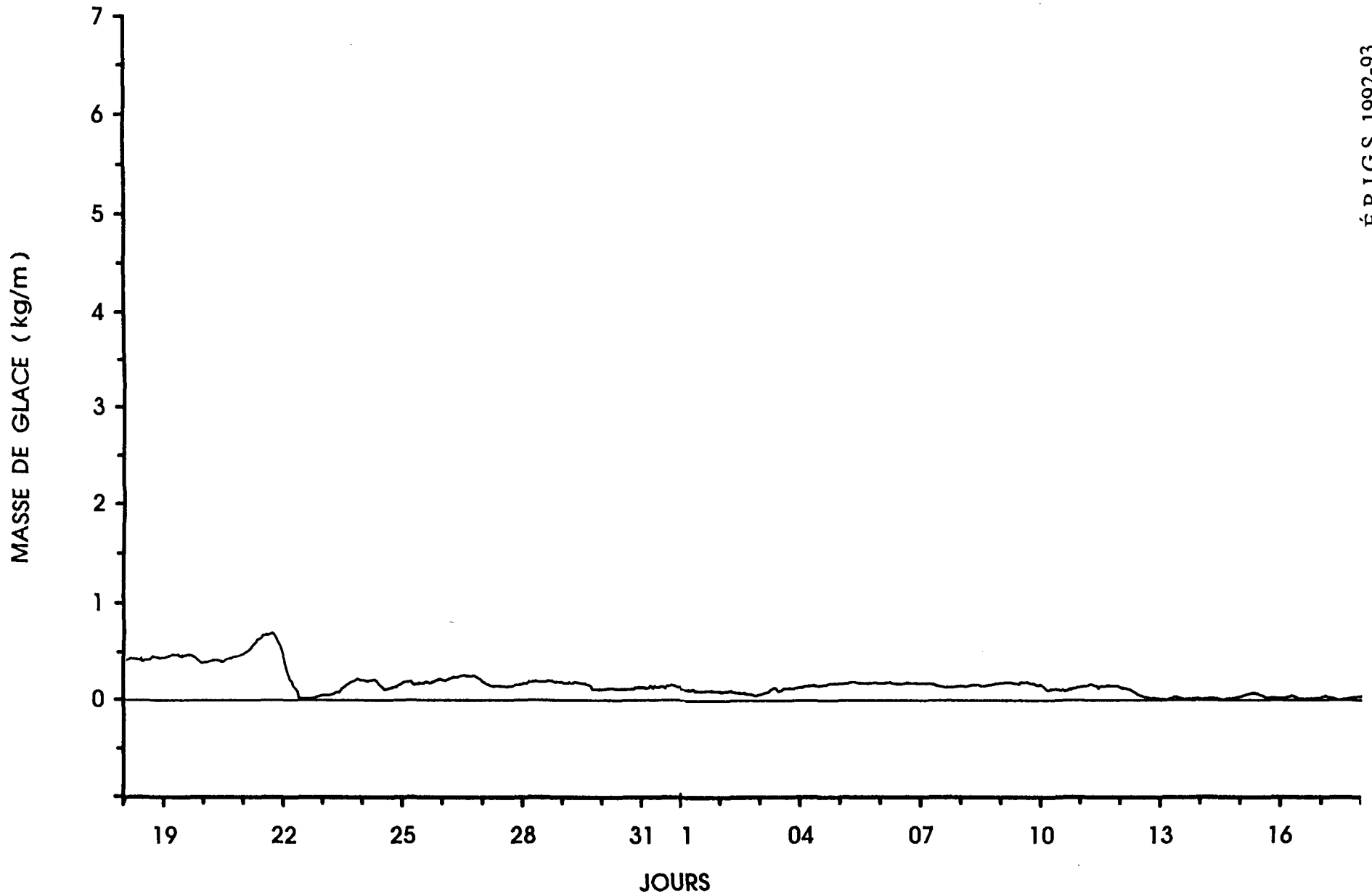


Figure 38 : Phase de maintien du 23 janvier au 2 février 1993 (câble Bersimis)

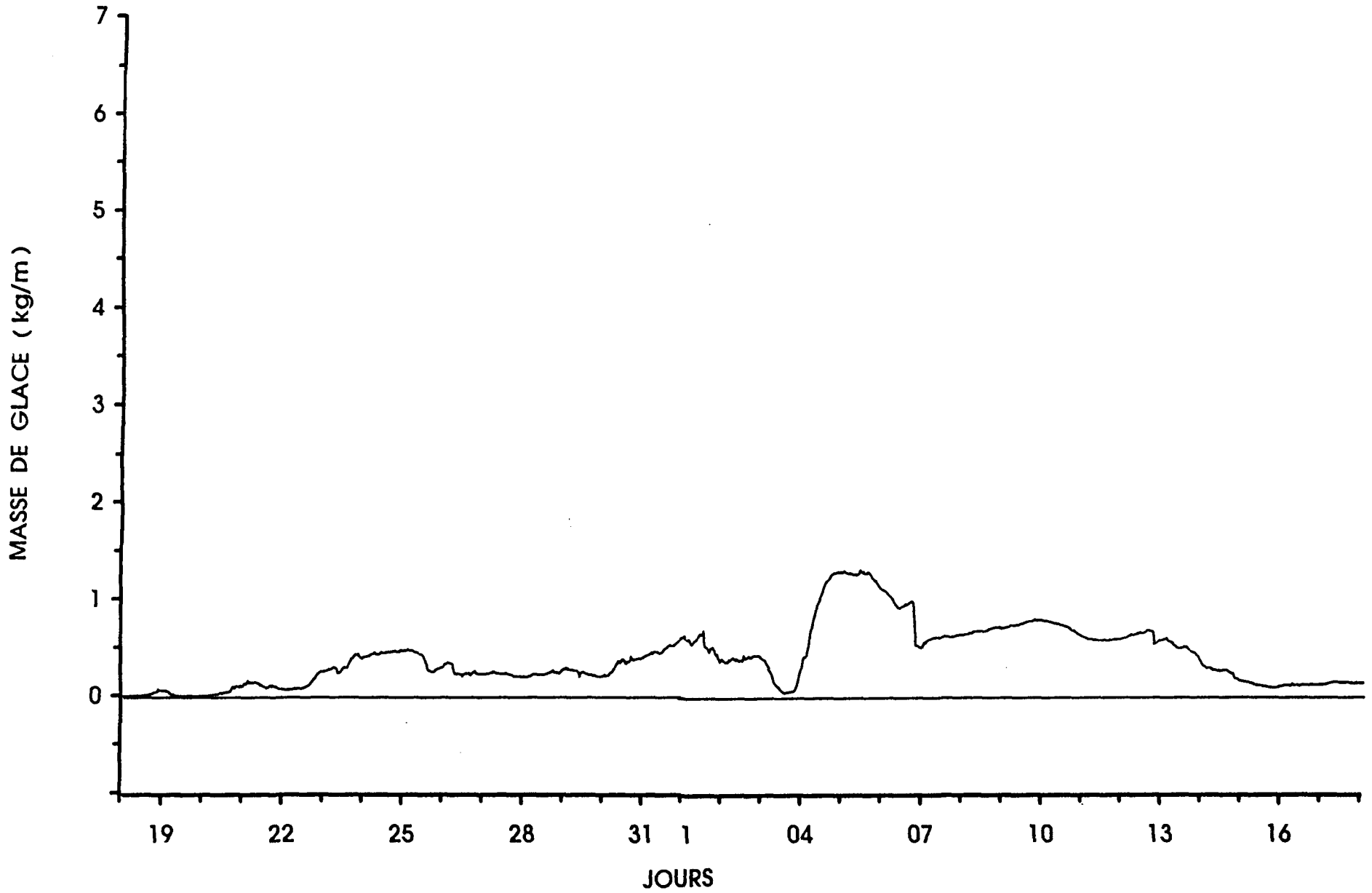


Figure 39 : Identification de deux événements indépendants
(câble de garde, décembre 1992 et janvier 1993)

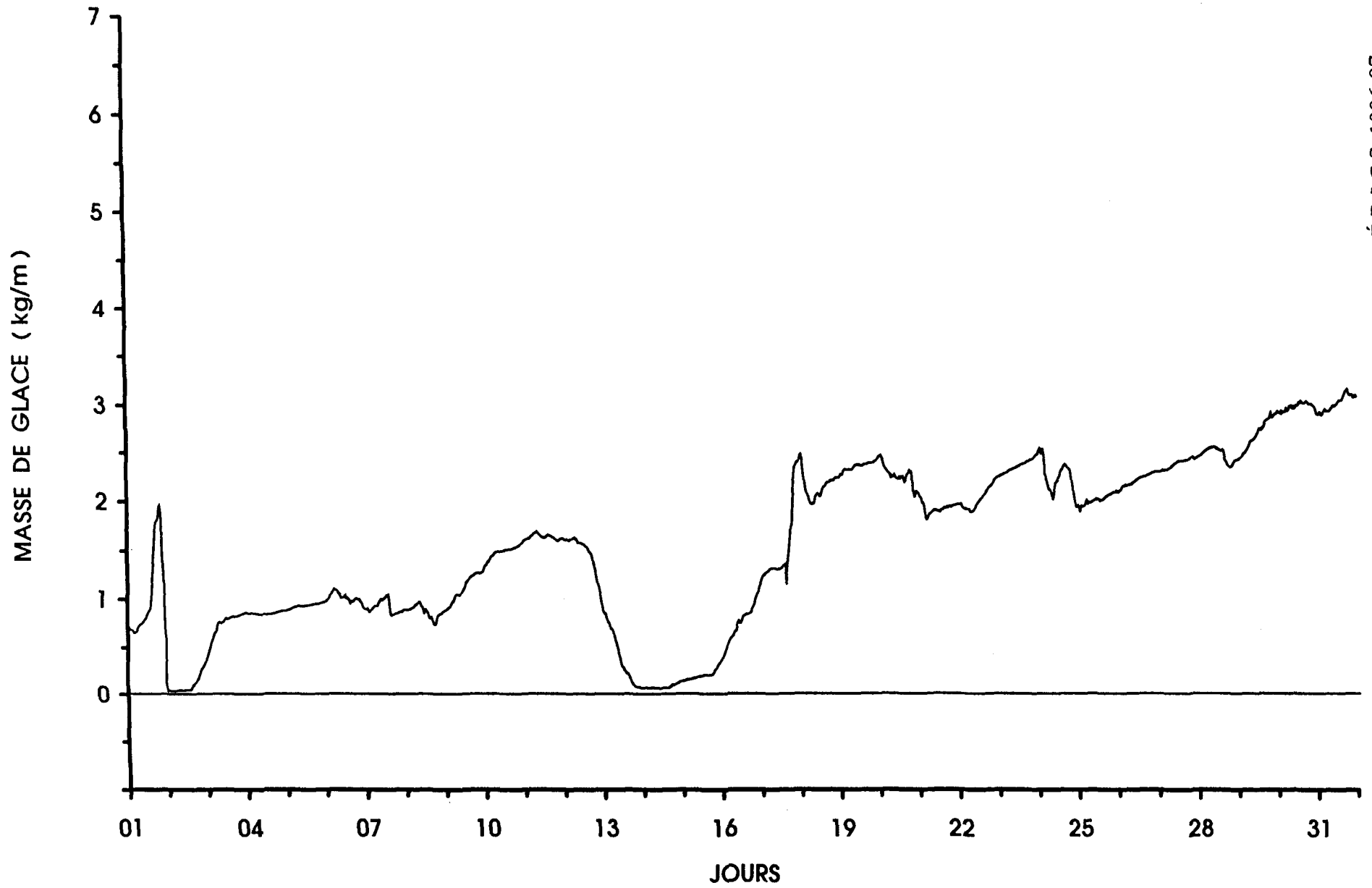


Figure 40 : Identification de deux événements indépendants
(câble de garde, décembre 1996)

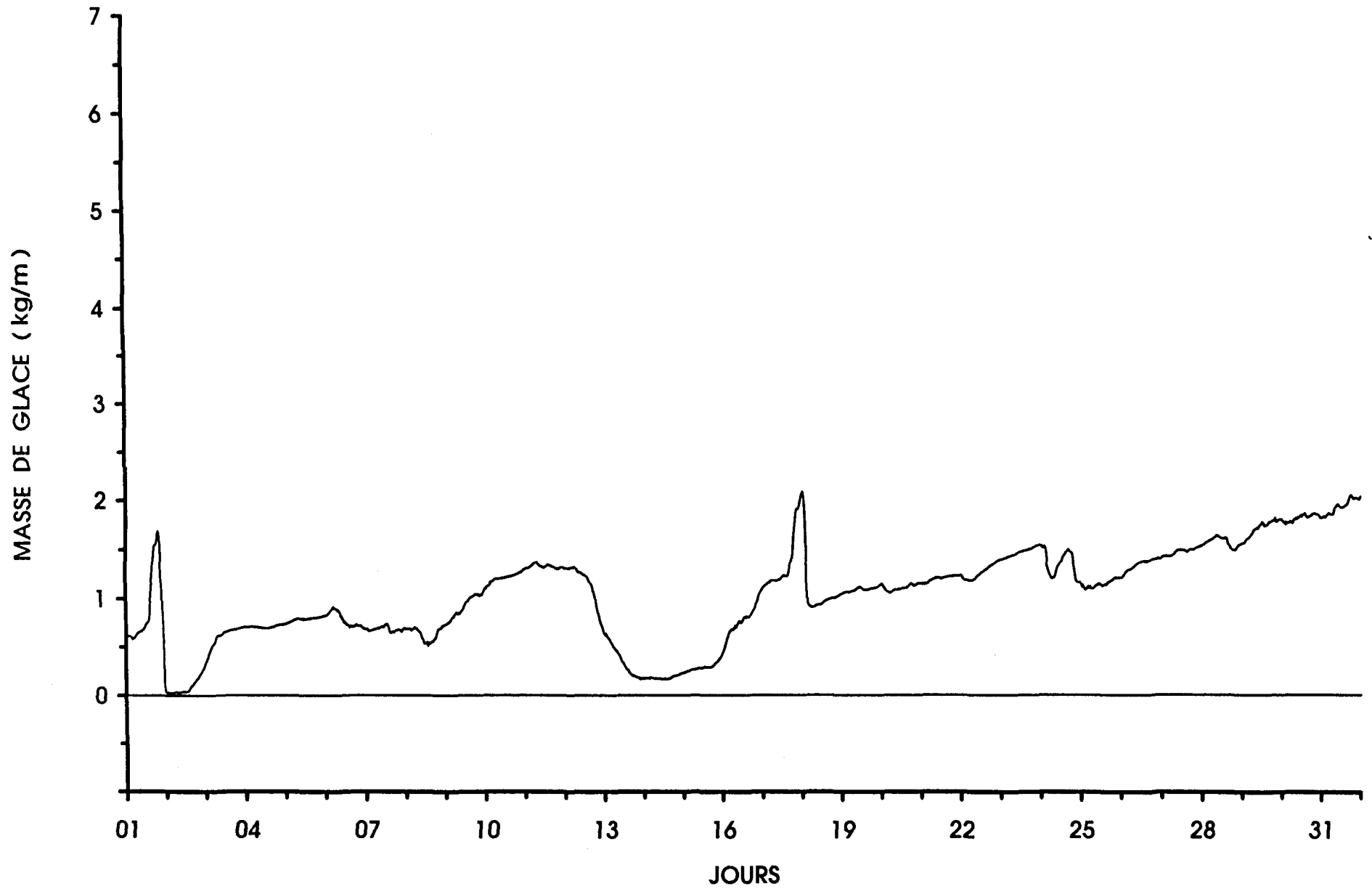


Figure 41 : Identification de deux événements indépendants
(câble Bersimis, décembre 1996)

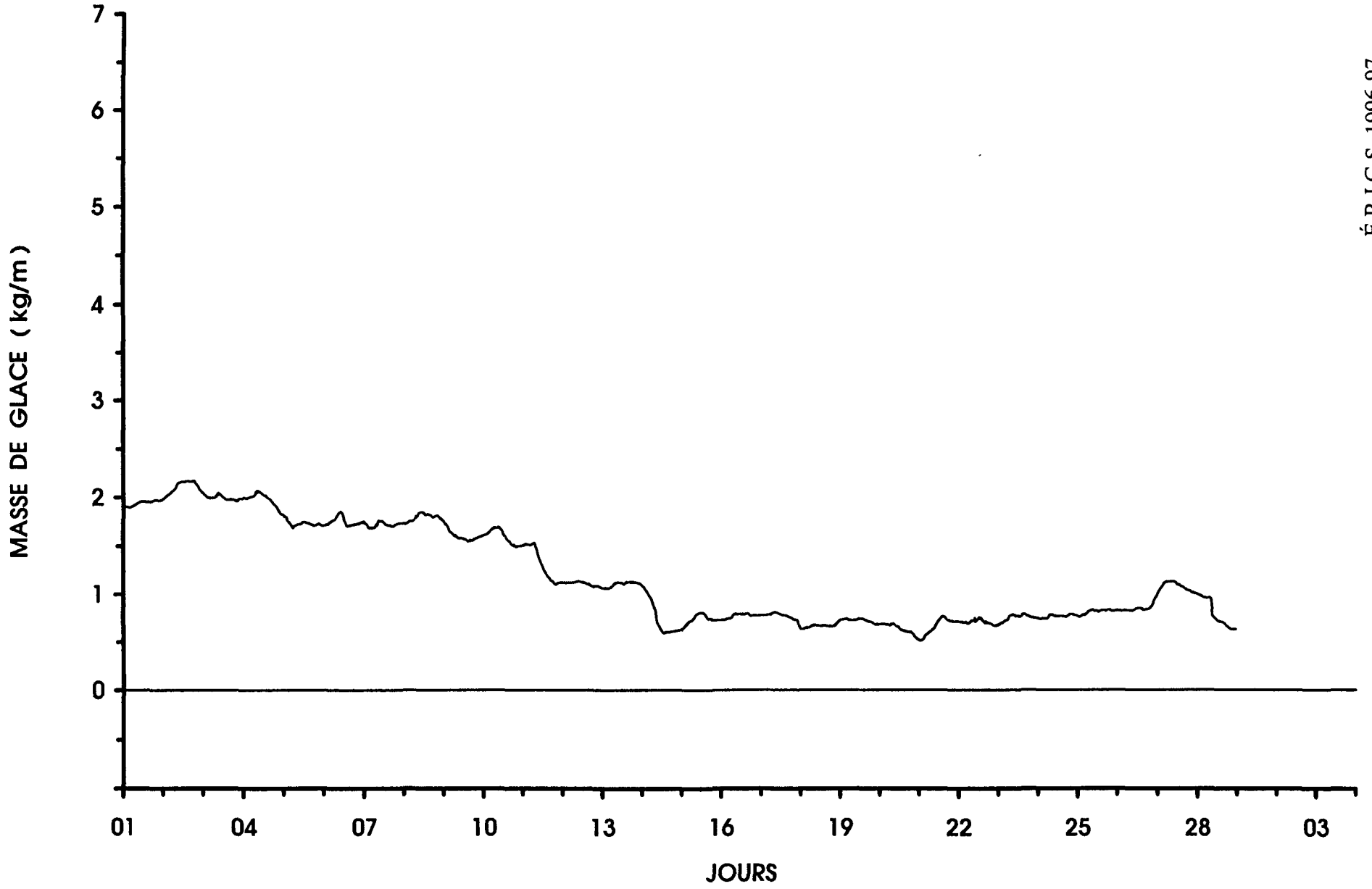
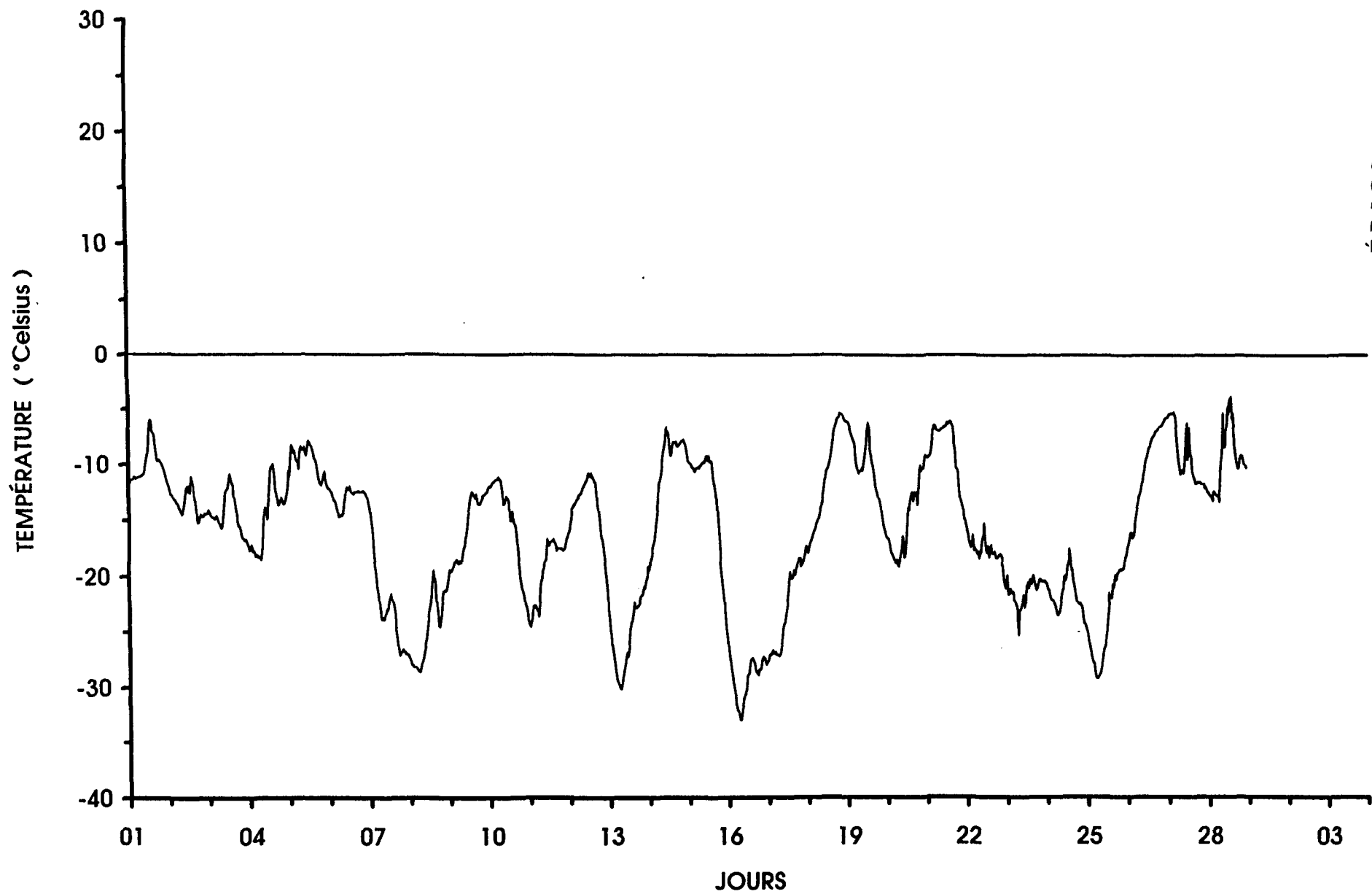


Figure 42 : Période de sublimation du 2 au 11 février 1997 (câble Bersimis)



É.R.I.G.S. 1996-97

Figure 43 : Période de sublimation de 2 au 11 février 1997 (câble Bersimis)

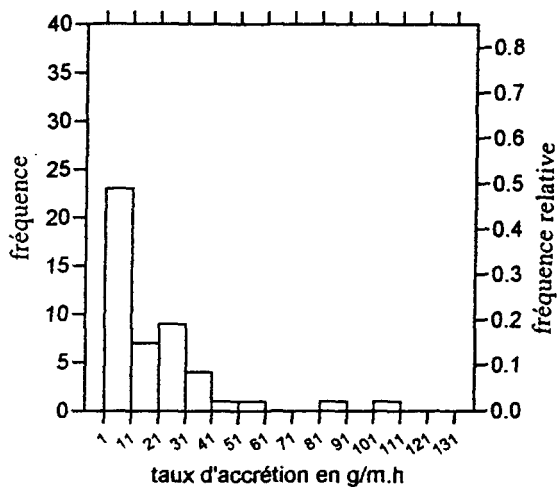


Figure 44.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

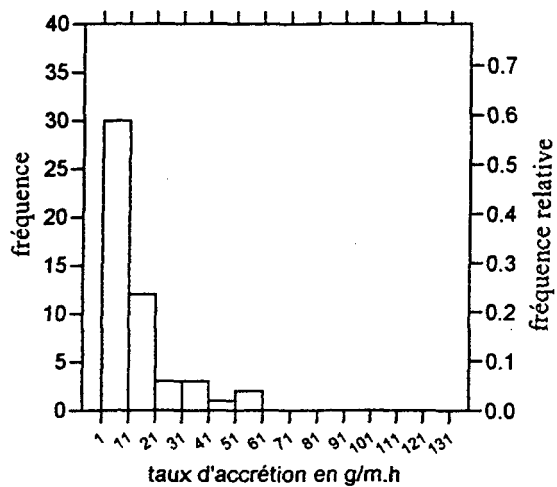


Figure 44.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

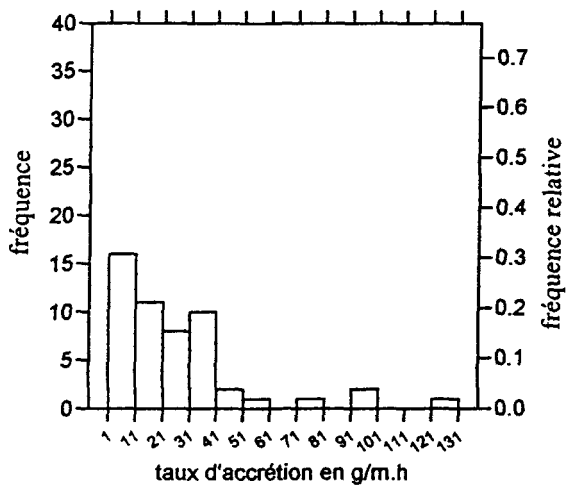


Figure 44.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

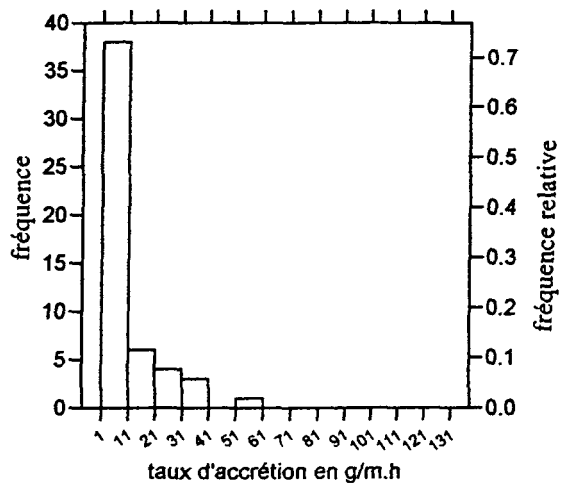


Figure 44.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 44 : Distribution du taux d'accrétion dans le cas du givre (saisons 1992-1993, 1993-1994 et 1994-1995)

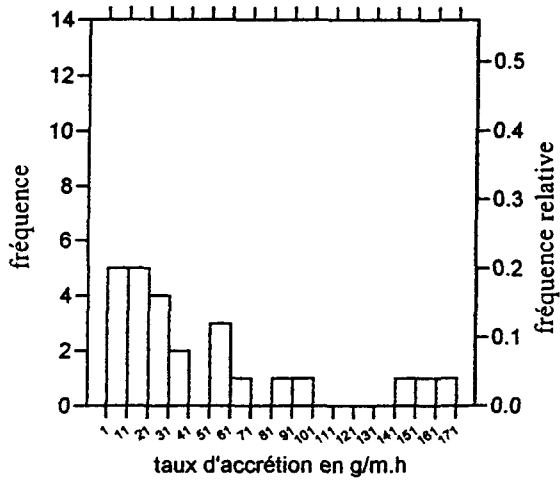


Figure 45.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

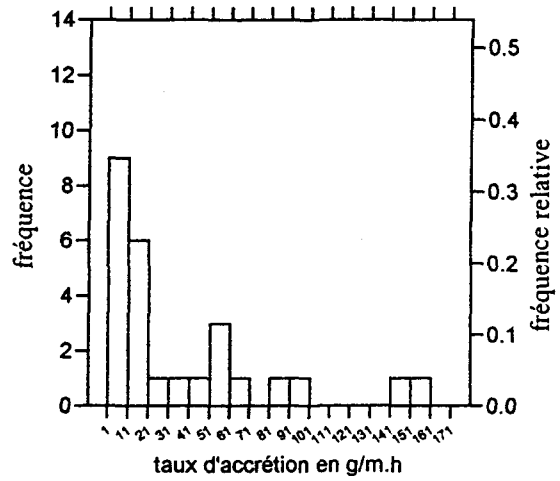


Figure 45.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

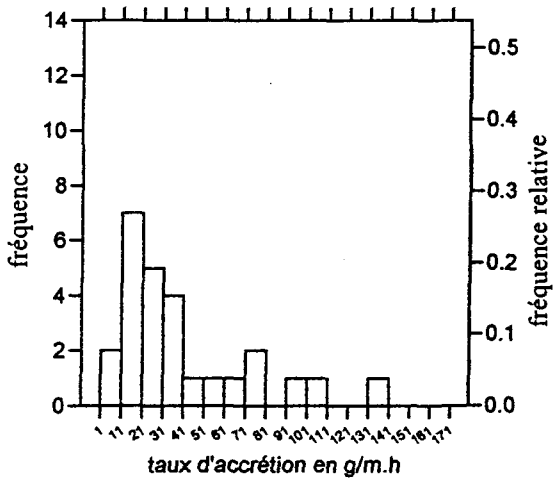


Figure 45.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

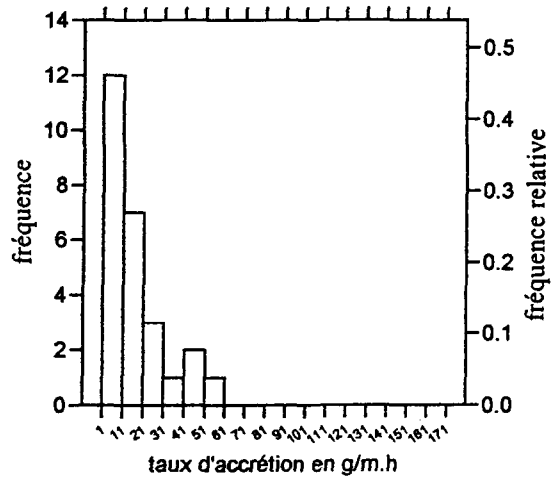


Figure 45.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 45 : Distribution du taux d'accrétion dans le cas du verglas (saisons 1992-1993, 1993-1994 et 1994-1995)

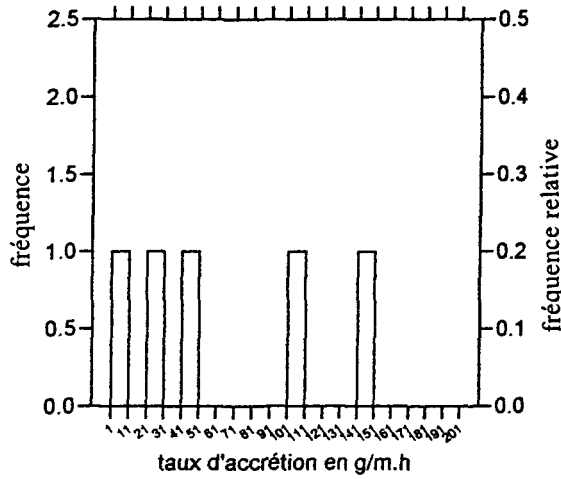


Figure 46.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

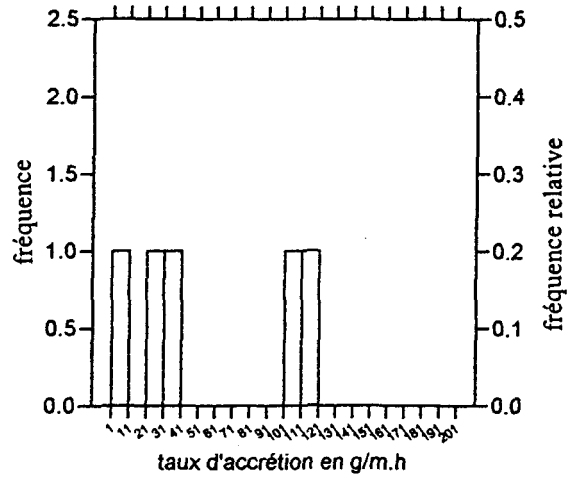


Figure 46.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

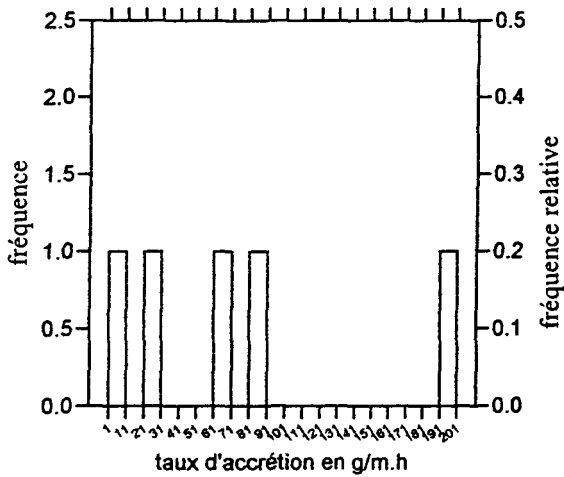


Figure 46.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

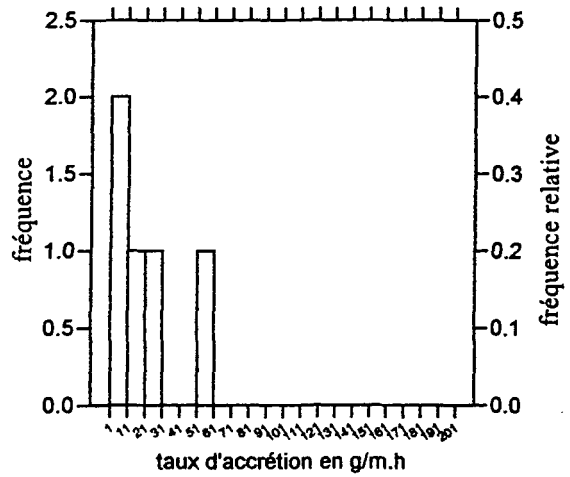


Figure 46.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 46 : Distribution du taux d'accrétion dans le cas de la neige mouillée (saisons 1992-1993, 1993-1994 et 1994-1995)

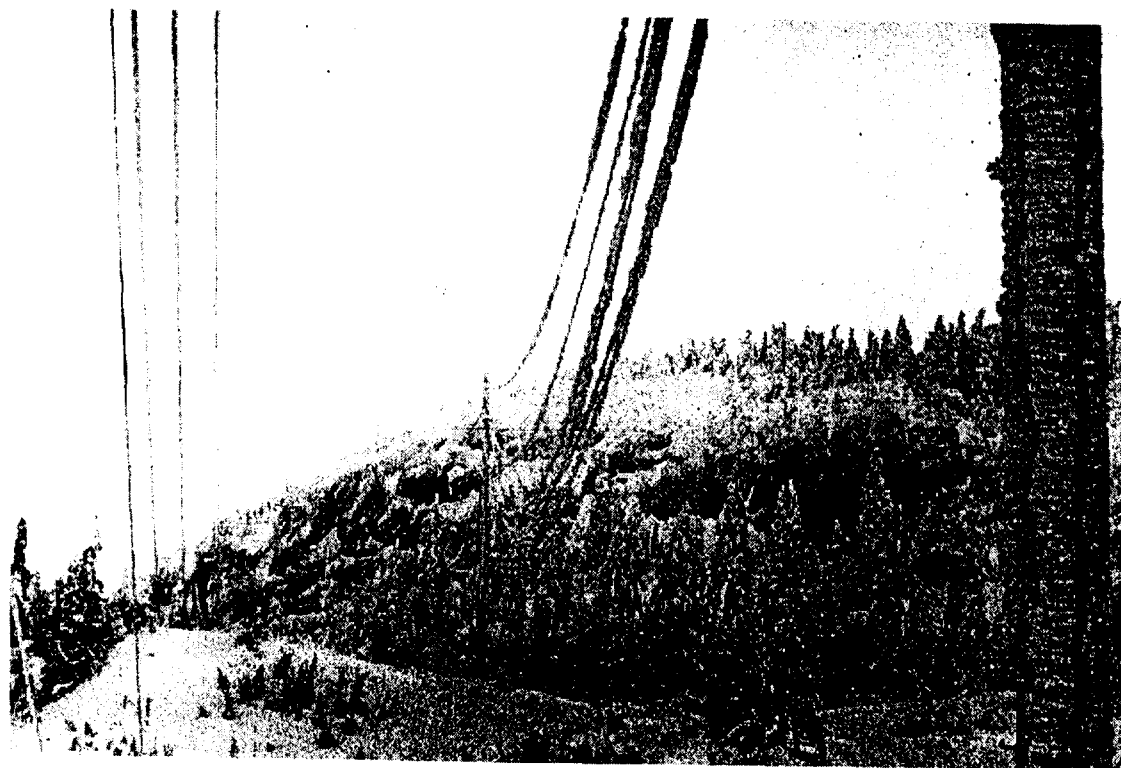


Figure 47 : Câbles recouverts de glace sur la ligne expérimentale du Mont Valin



Figure 48 : Manchon de glace



Figure 49: Manchon de glace

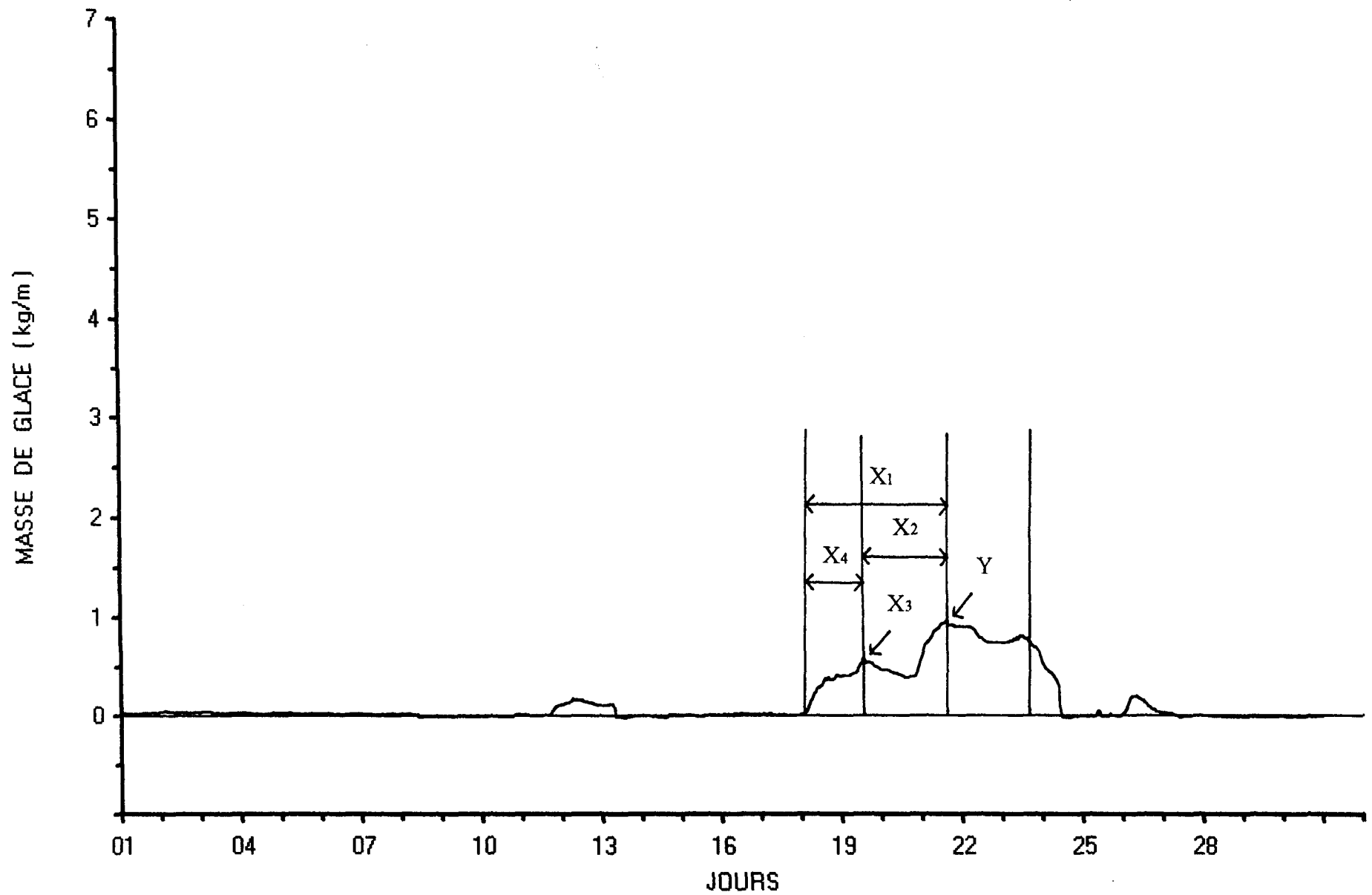


Figure 50 : Phase de maintien du 19 au 23 avril 1993 (câble de garde)

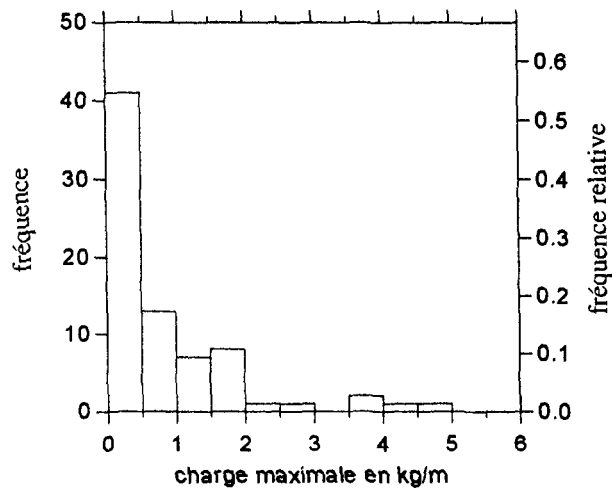


Figure 51.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

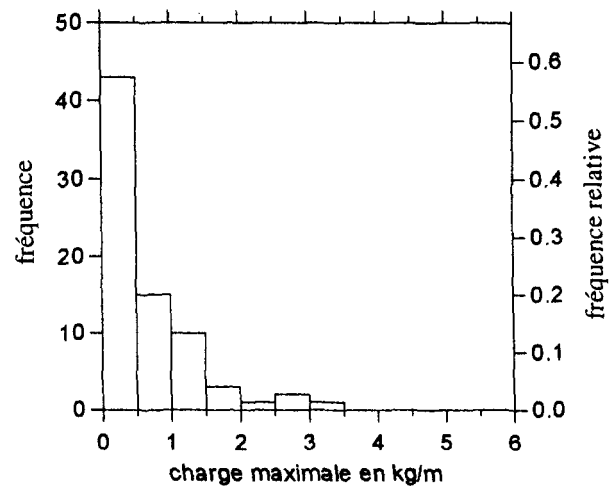


Figure 51.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

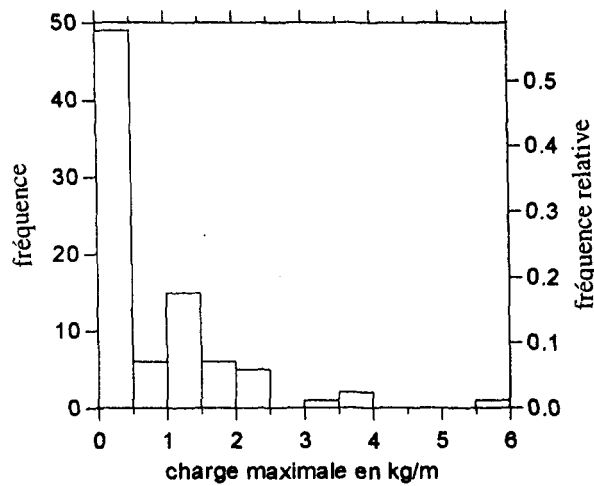


Figure 51.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

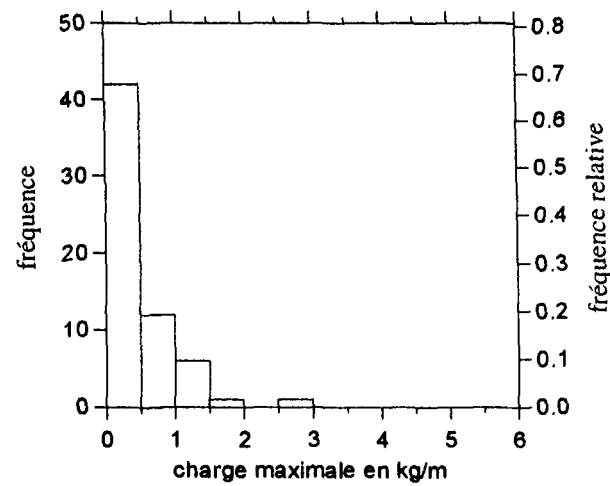


Figure 51.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 51 : Distribution de la charge maximale

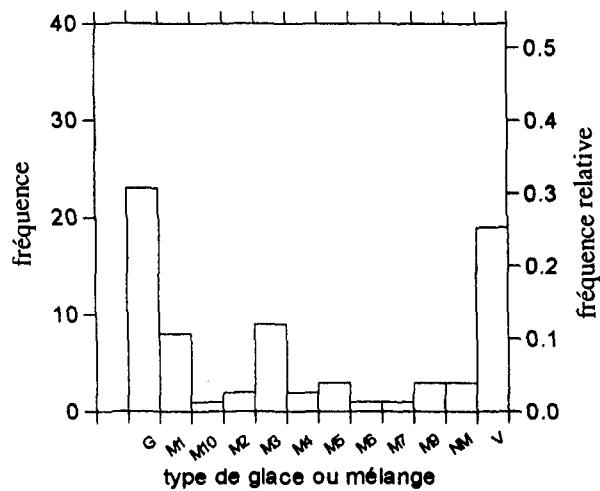


Figure 52.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

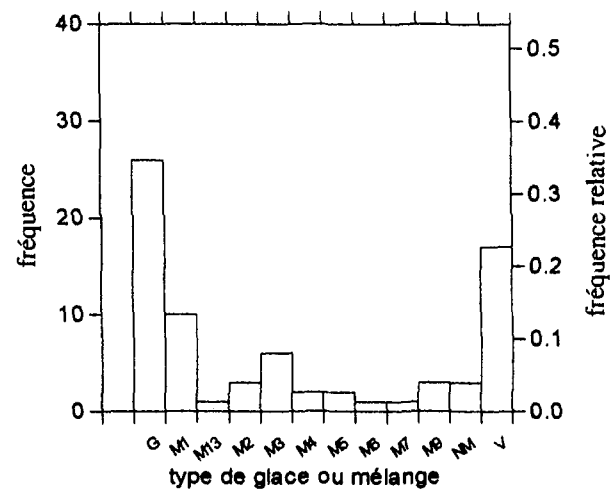


Figure 52.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

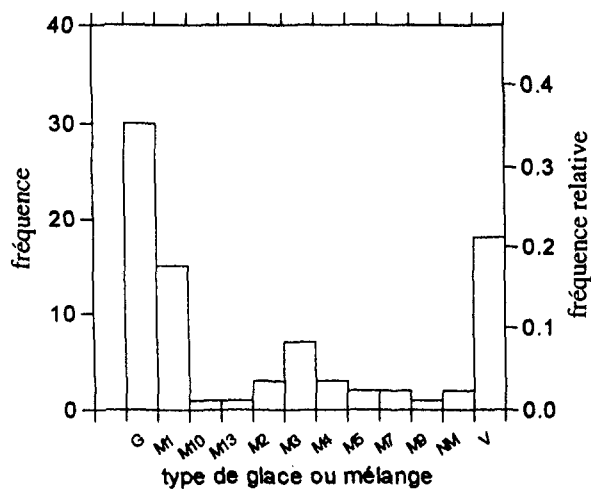


Figure 52.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

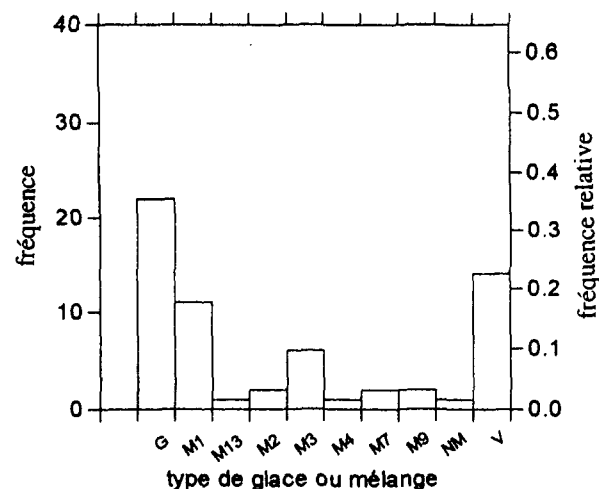


Figure 52.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 52 : Distribution du type de glace ou de mélange correspondant à la charge maximale

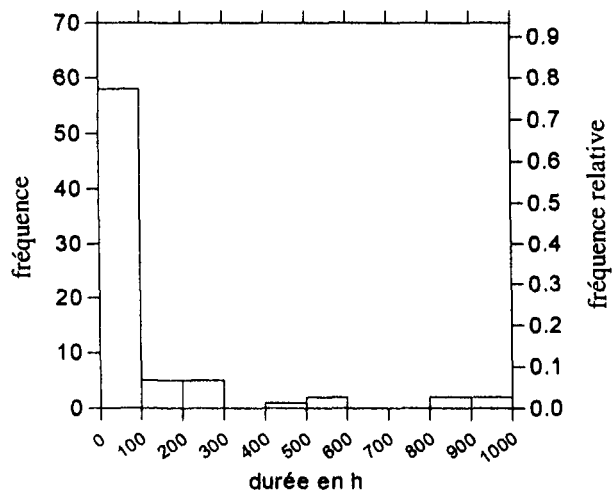


Figure 53.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

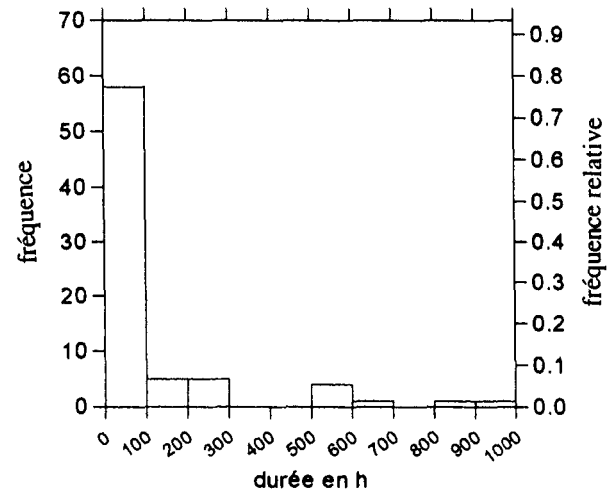


Figure 53.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

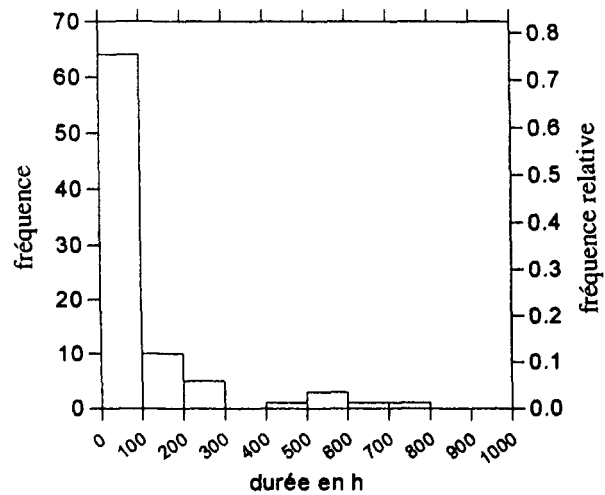


Figure 53.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

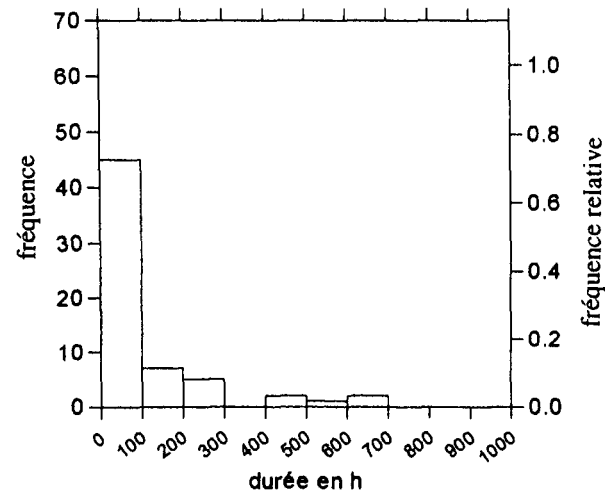


Figure 53.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 53 : Distribution de la durée entre le début de la phase de maintien et l'instant où la charge maximale est atteinte

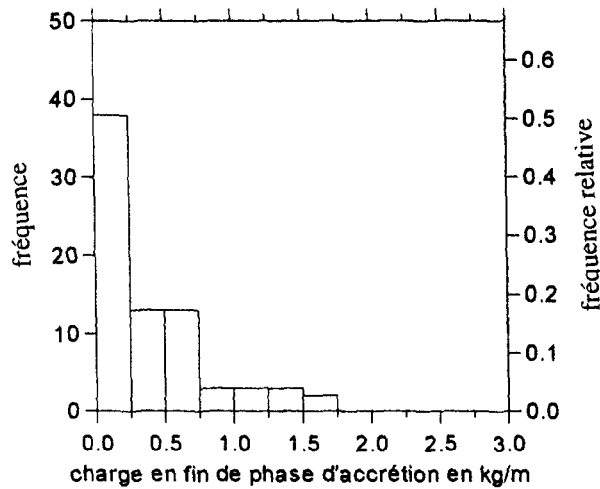


Figure 54.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

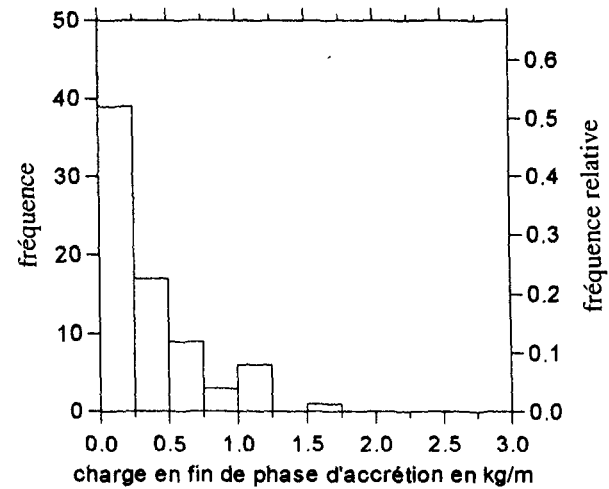


Figure 54.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

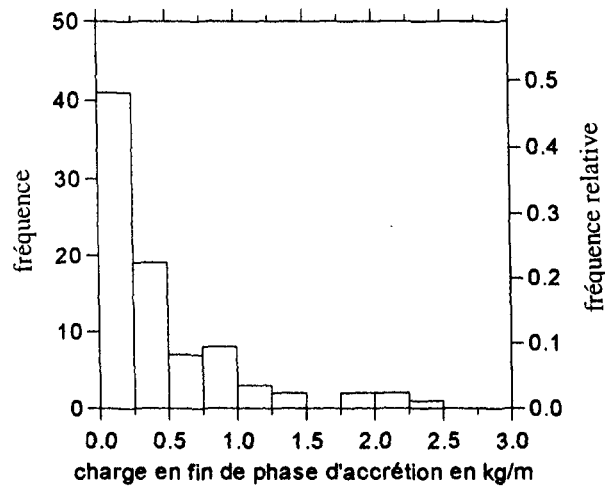


Figure 54.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

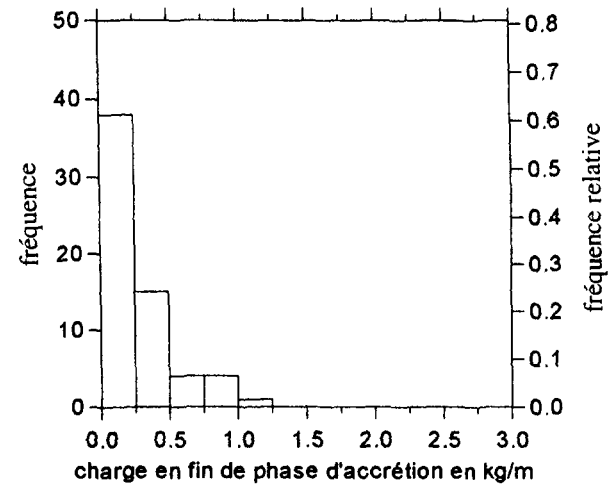


Figure 54.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 54 : Distribution de la charge de glace en fin de phase d'accrétion

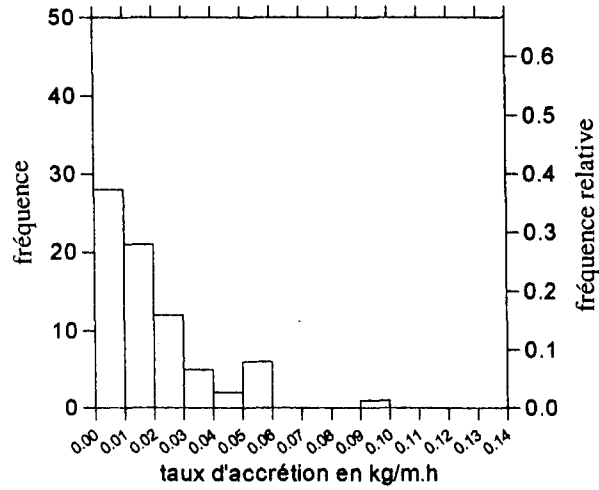


Figure 55.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

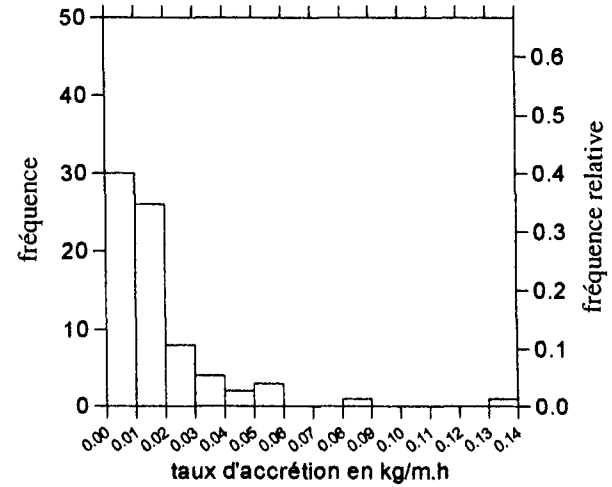


Figure 55.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

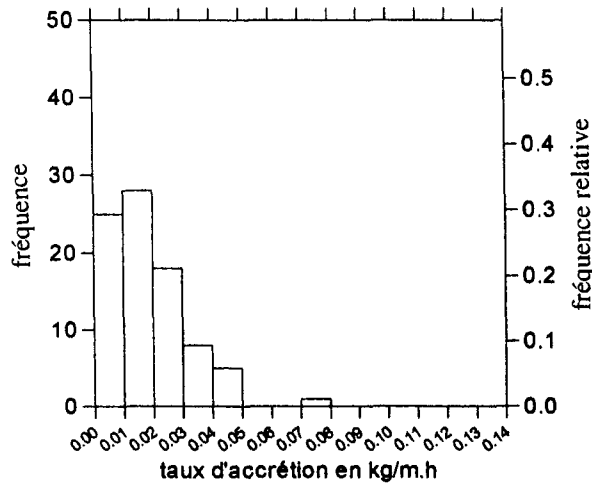


Figure 55.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

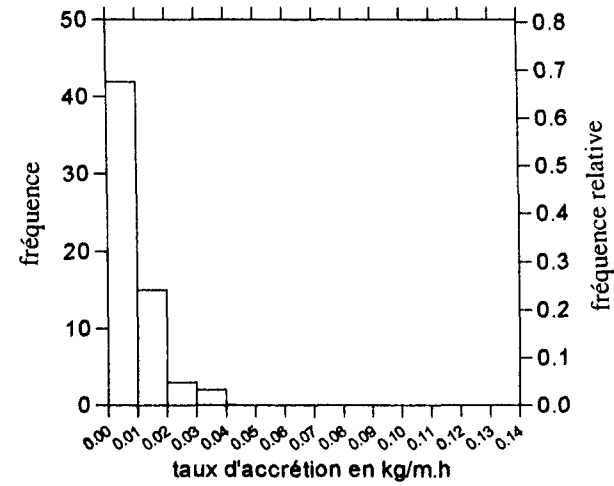


Figure 55.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 55 : Distribution du taux d'accrétion moyen pendant la phase d'accrétion

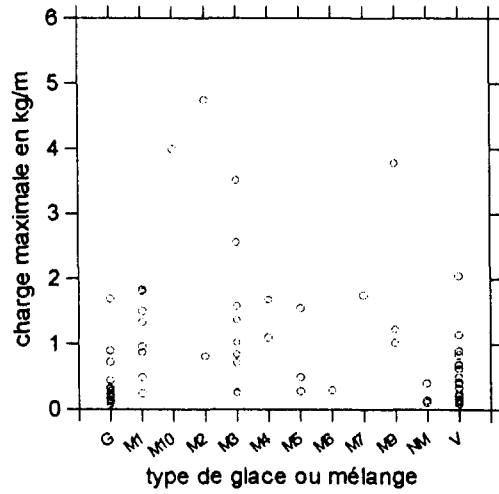


Figure 56.a

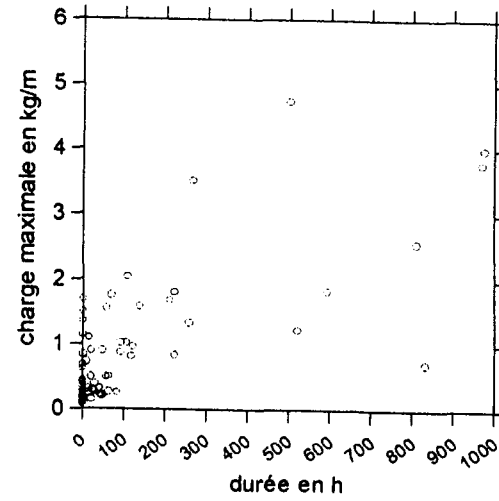


Figure 56.b

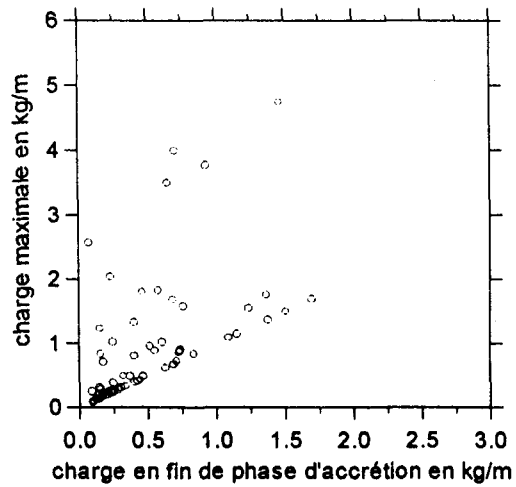


Figure 56.c

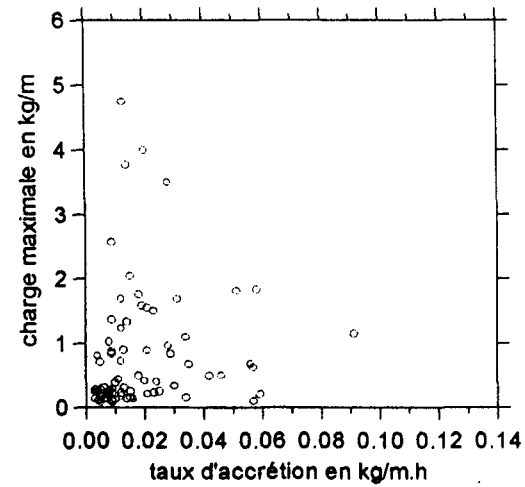


Figure 56.d

Figure 56 : Relation entre la charge maximale et les variables indépendantes sur le câble Bersimis

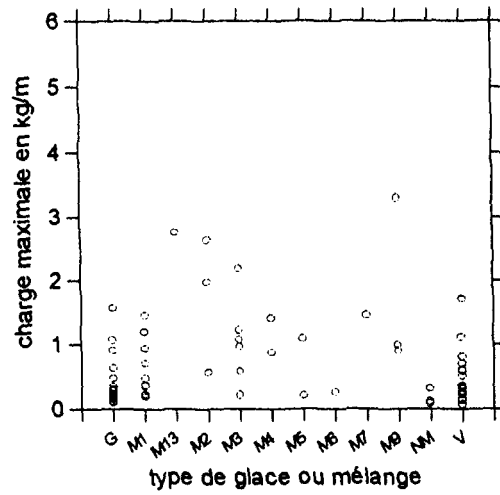


Figure 57.a

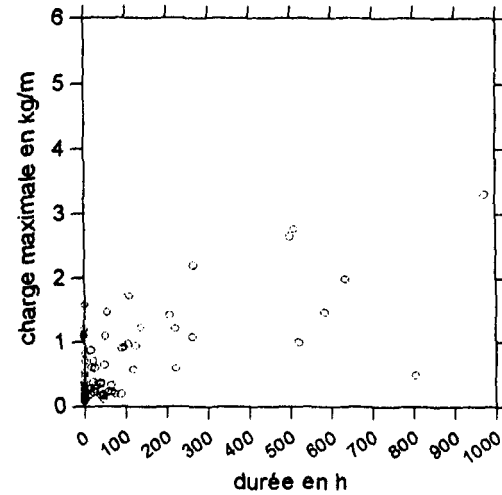


Figure 57.b

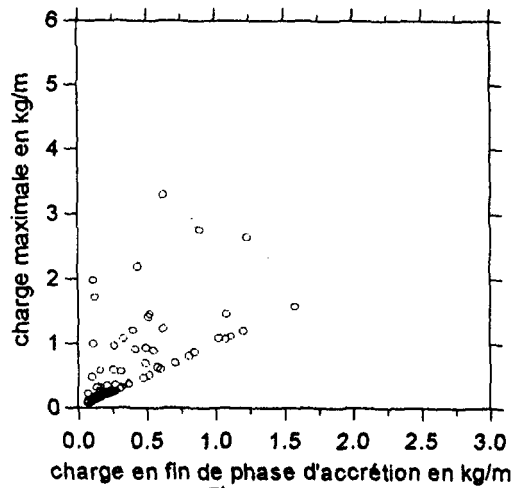


Figure 57.c

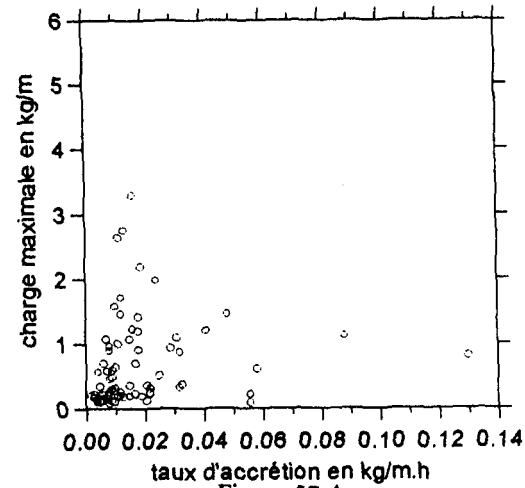


Figure 57.d

Figure 57 : Relation entre la charge maximale et les variables indépendantes sur le câble du faisceau

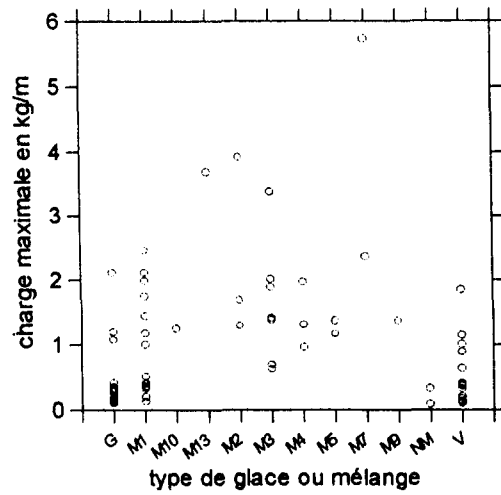


Figure 58.a

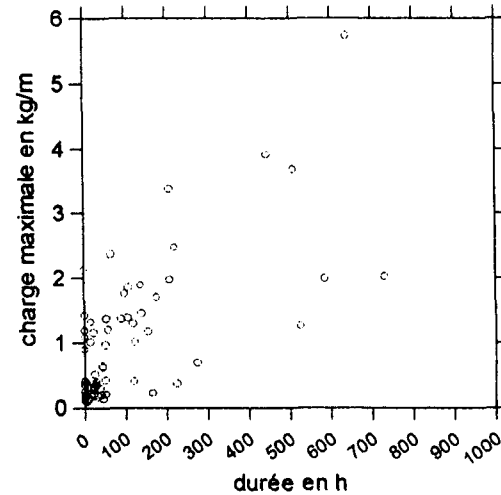


Figure 58.b

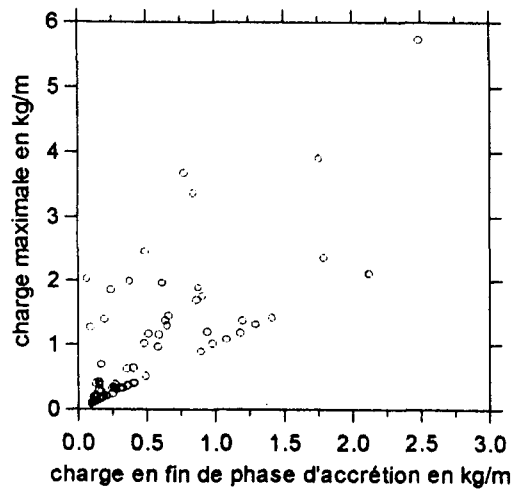


Figure 58.c

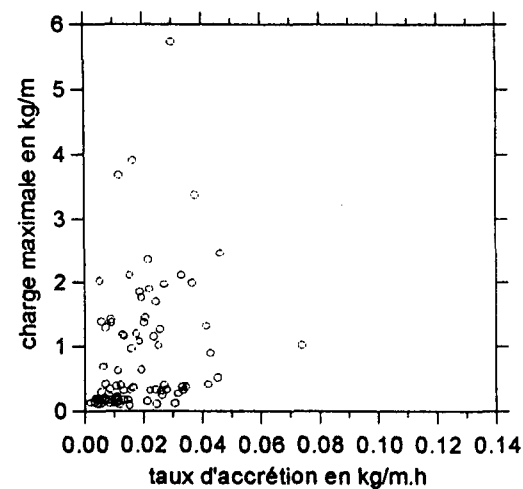


Figure 58.d

Figure 58 : Relation entre la charge maximale et les variables indépendantes sur le câble de garde

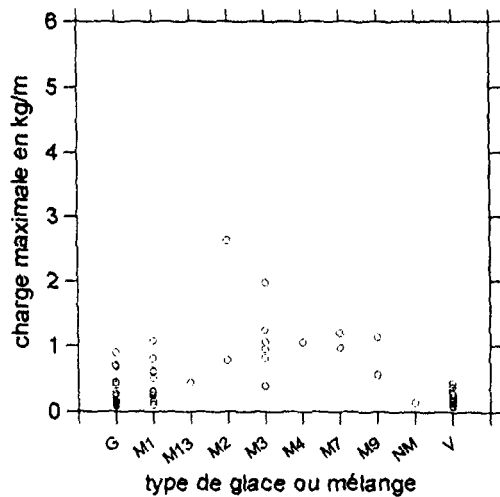


Figure 59.a

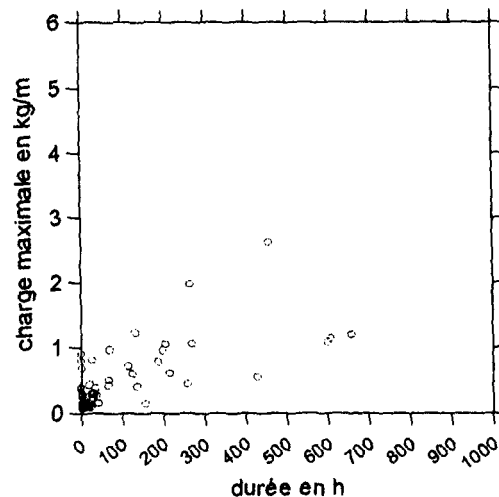


Figure 59.b

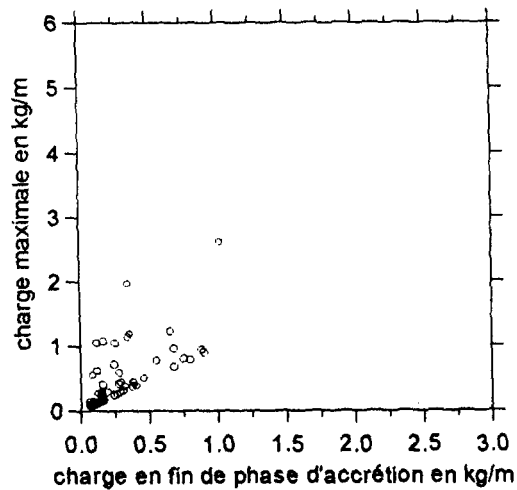


Figure 59.c

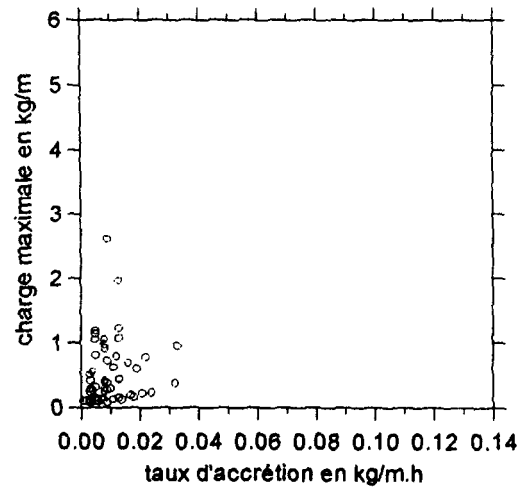


Figure 59.d

Figure 59 : Relation entre la charge maximale et les variables indépendantes sur le câble tétra-

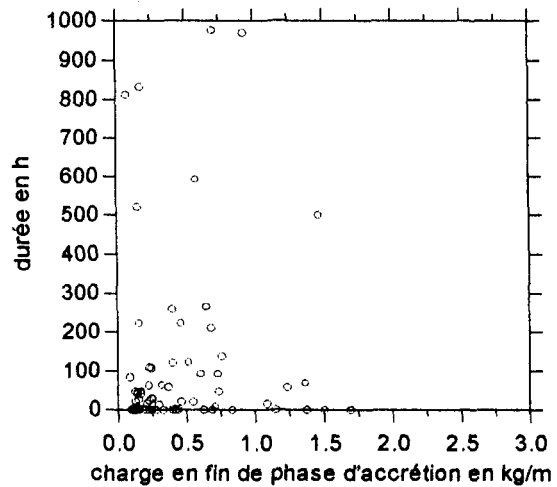


Figure 60.a

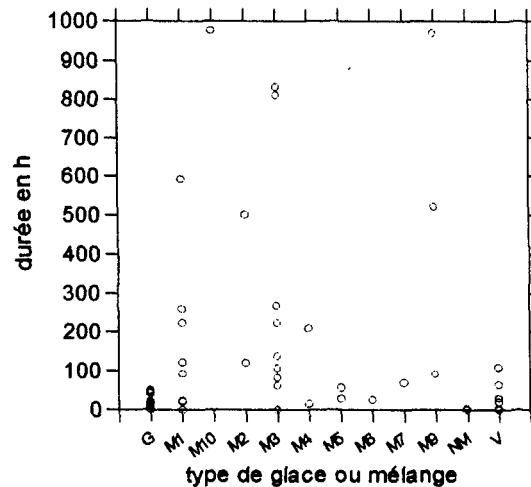


Figure 60.b

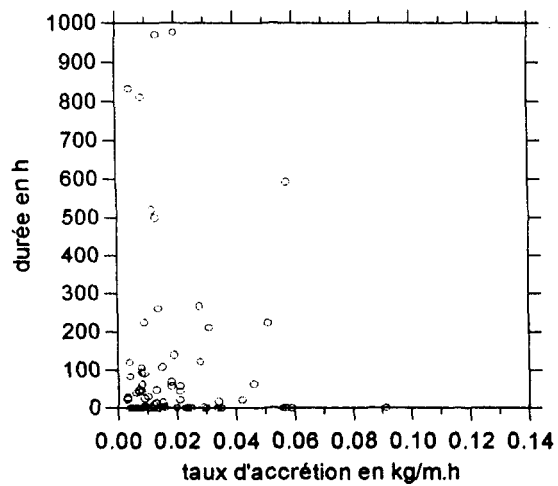


Figure 60.c

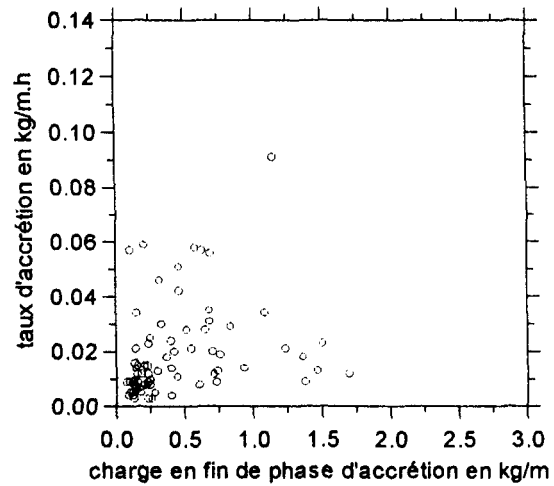


Figure 60.d

Figure 60 : Relations entre les variables indépendantes sur le câble Bersimis

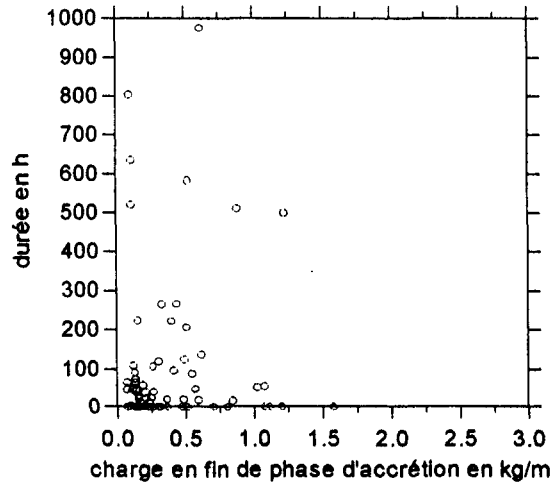


Figure 61.a

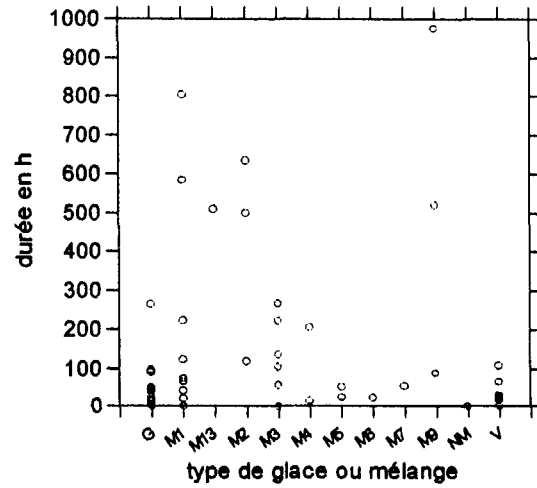


Figure 61.b

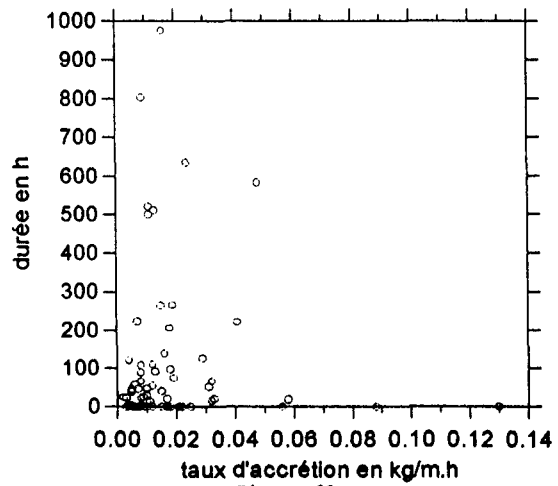


Figure 61.c

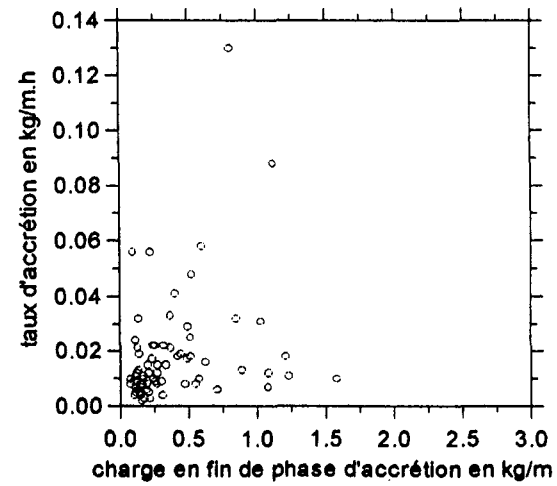


Figure 61.d

Figure 61 : Relations entre les variables indépendantes sur le câble du faisceau

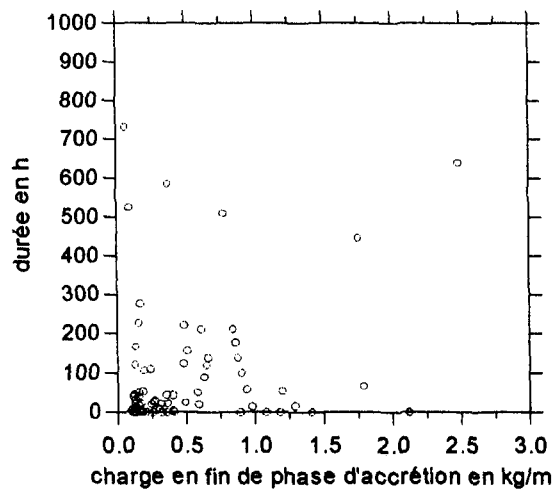


Figure 62.a

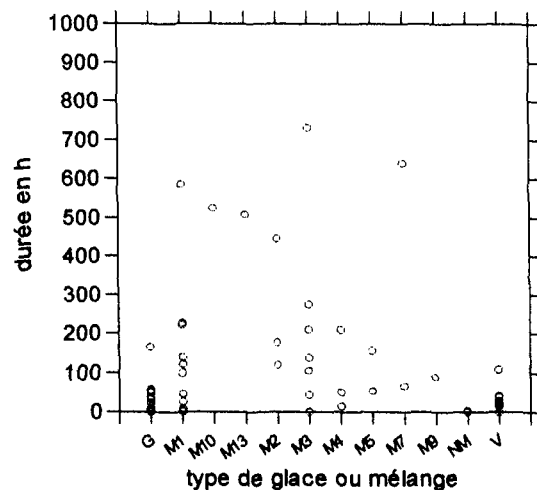


Figure 62.b

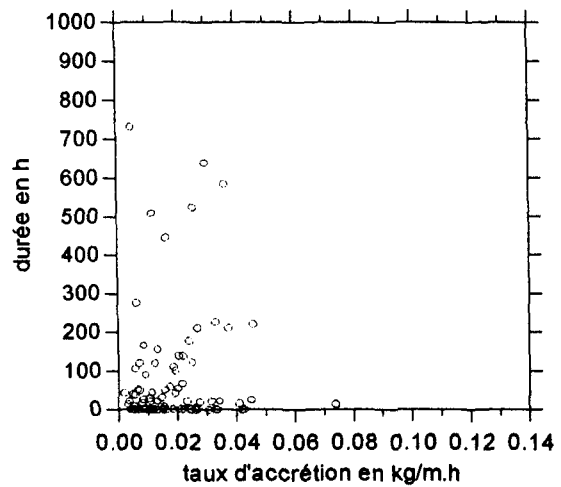


Figure 62.c

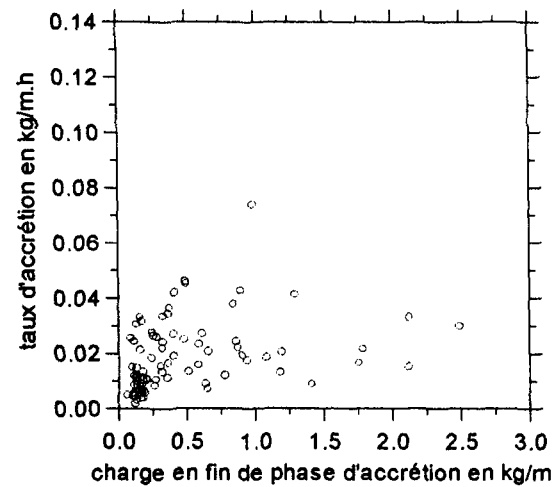


Figure 62.d

Figure 62 : Relations entre les variables indépendantes sur le câble de garde

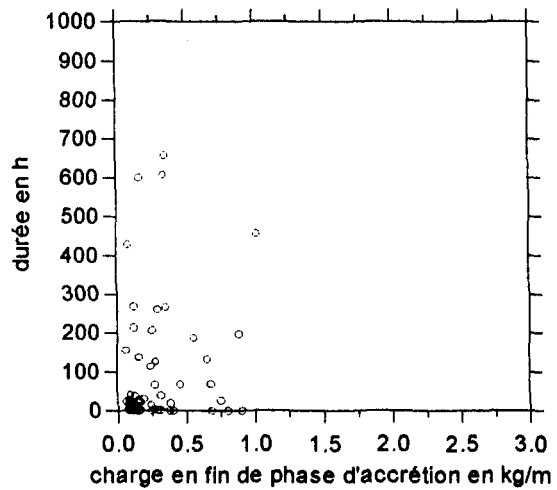


Figure 63.a

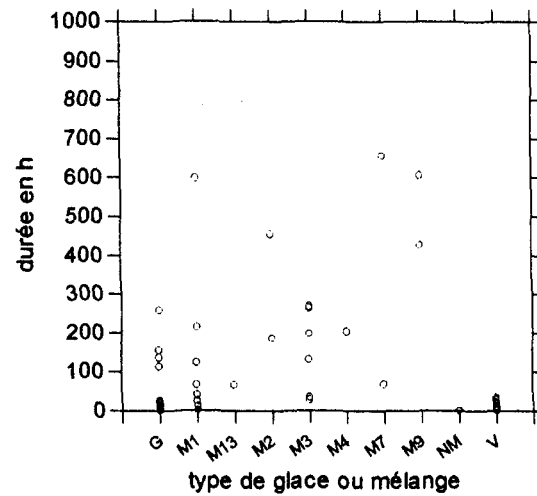


Figure 63.b

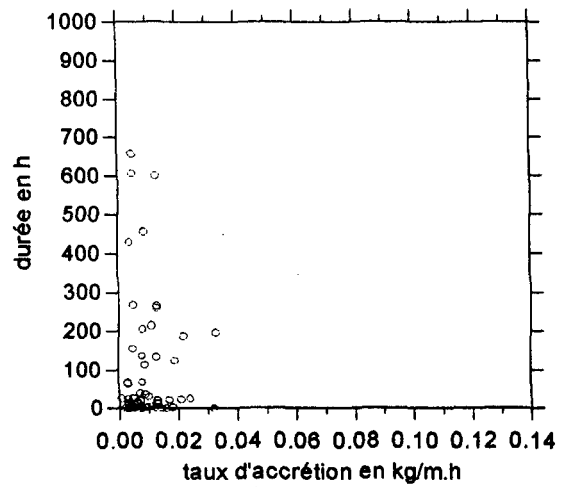


Figure 63.c

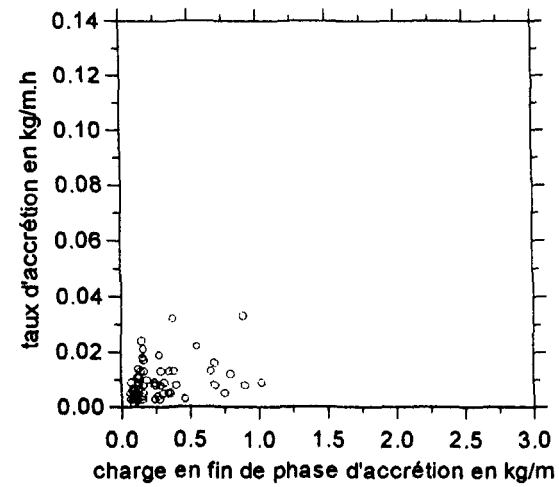


Figure 63.d

Figure 63 : Relations entre les variables indépendantes sur le câble témoin

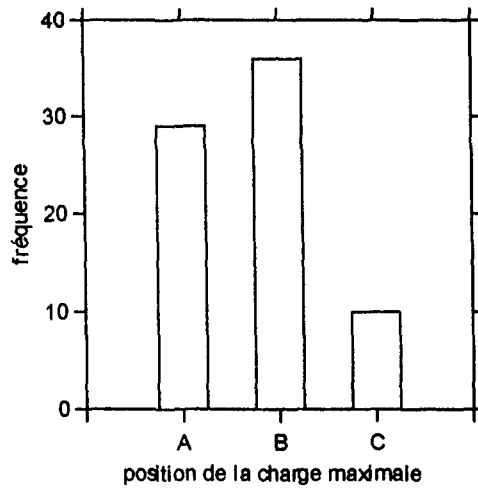


Figure 64.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

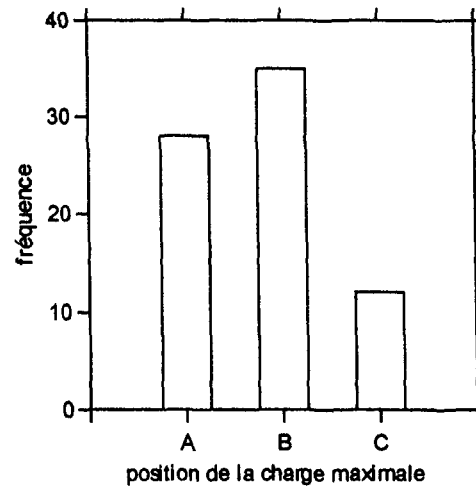


Figure 64.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

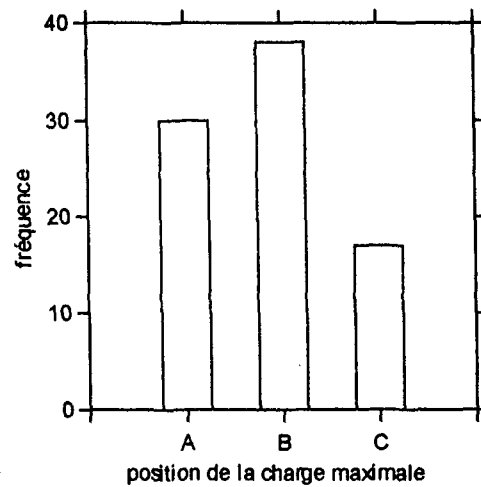


Figure 64.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

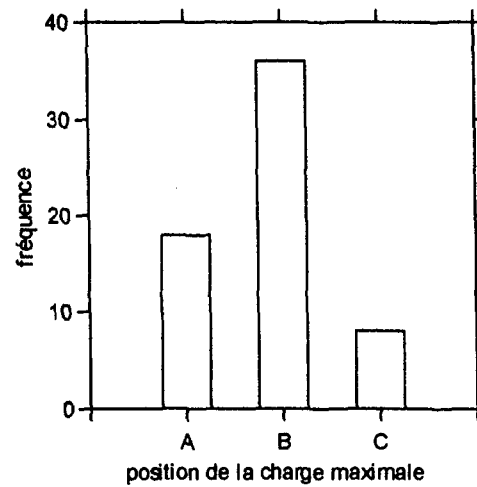


Figure 64.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

A : Début du maintien
 B : Milieu du maintien
 C : Fin du maintien

Figure 64 : Position de la charge maximale dans la phase de maintien

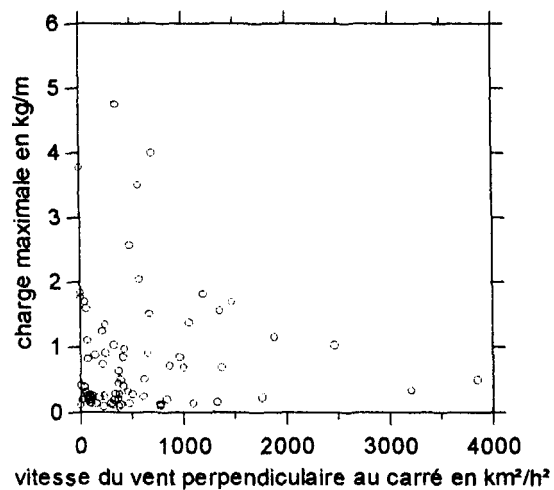


Figure 65.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

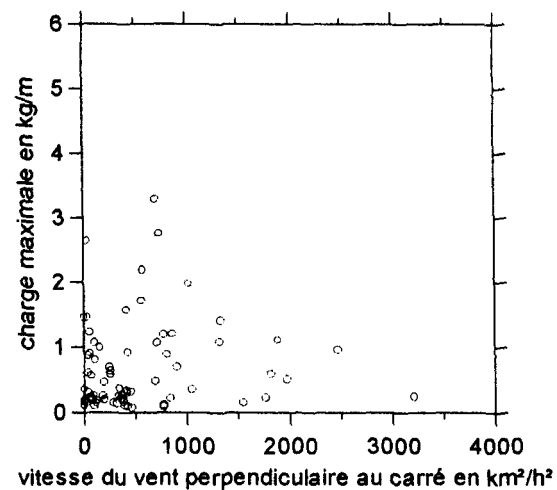


Figure 65.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

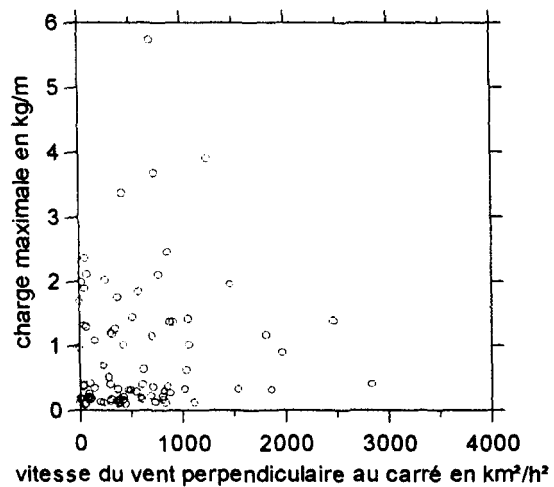


Figure 65.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

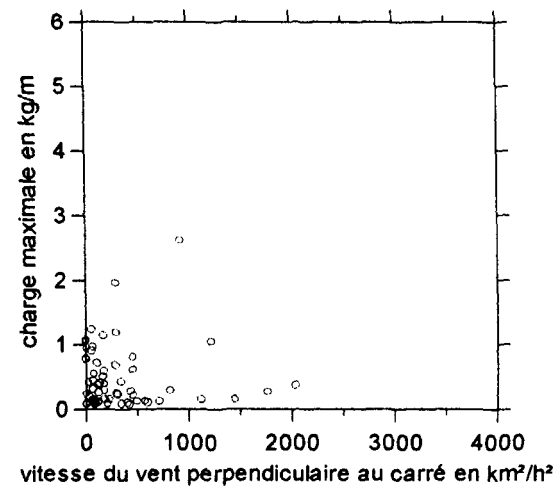


Figure 65.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 65 : Relation entre la charge maximale et la vitesse du vent perpendiculaire au carré relative à la charge maximale

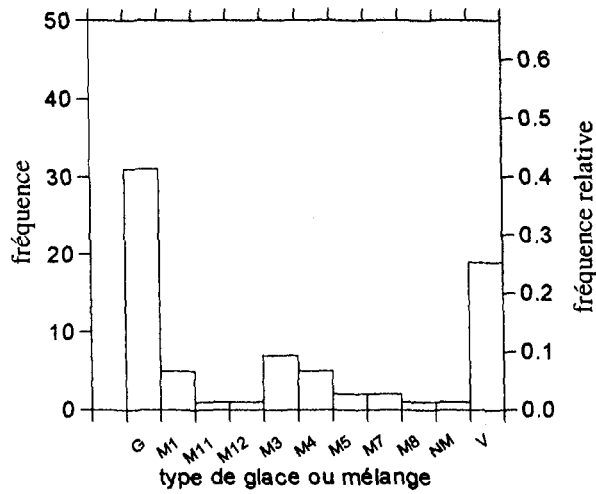


Figure 66.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

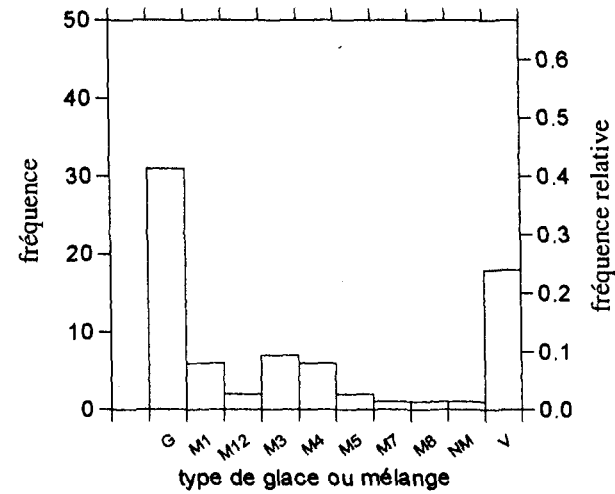


Figure 66.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

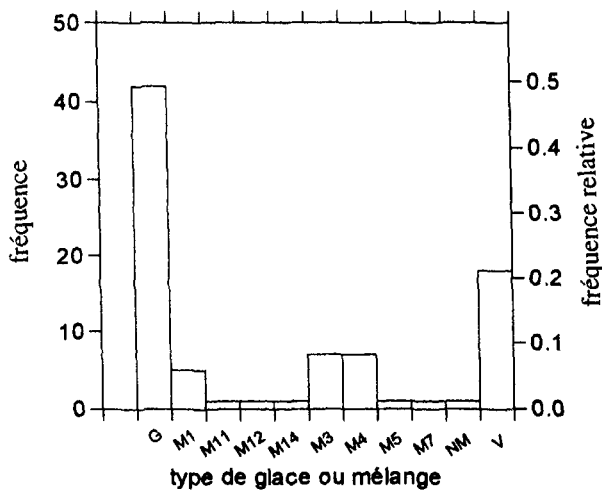


Figure 66.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

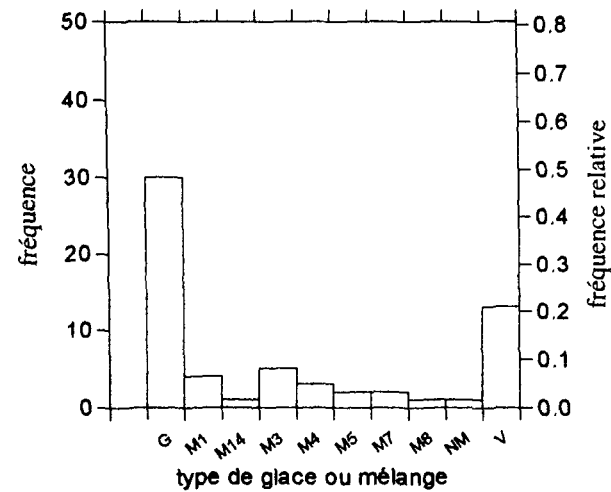


Figure 66.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 66 : Distribution du type de glace ou mélange pendant la phase de maintien

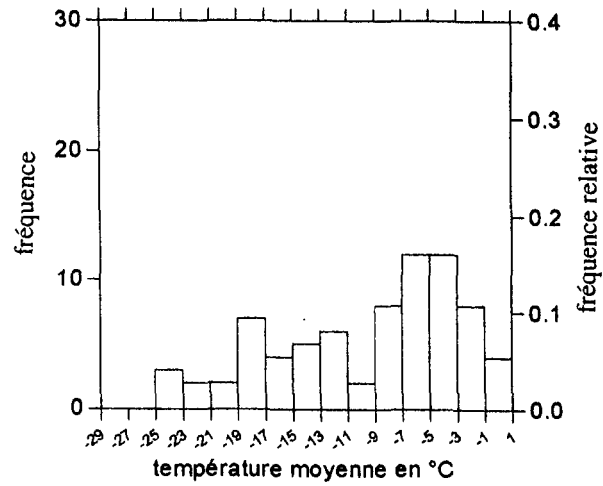


Figure 67.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

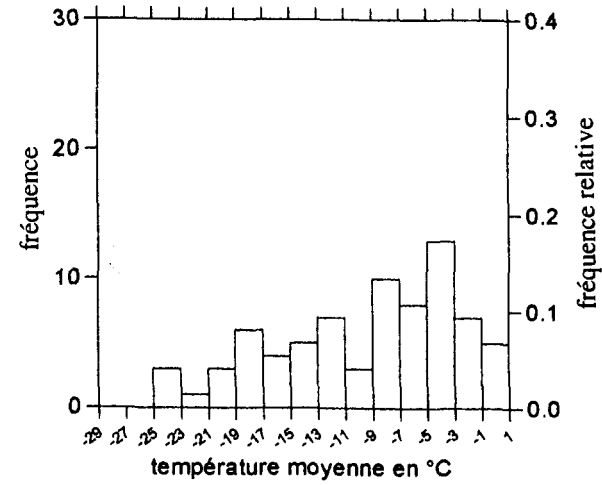


Figure 67.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

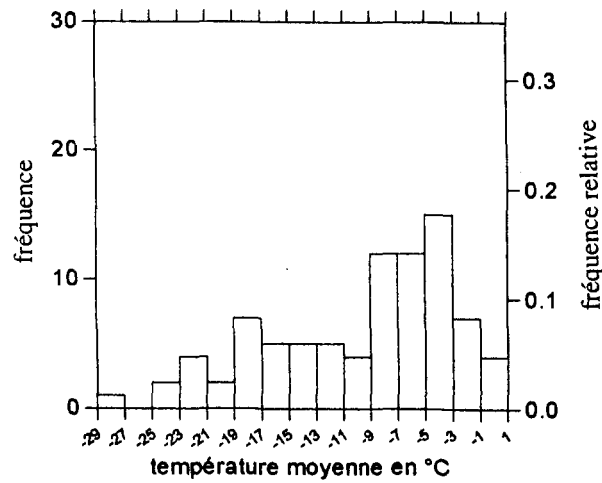


Figure 67.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

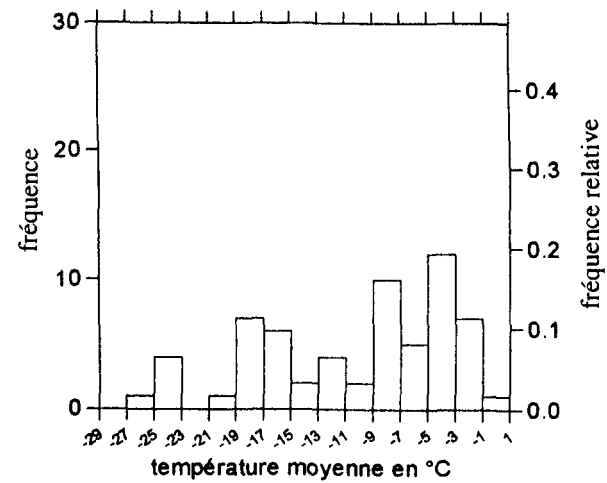


Figure 67.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 67 : Distribution de la température moyenne pendant la phase de maintien

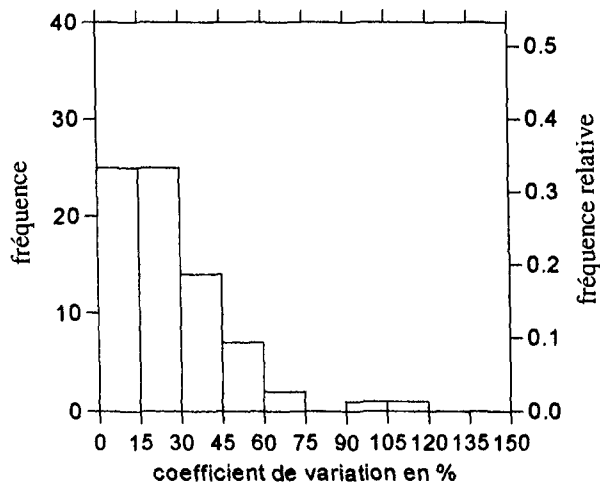


Figure 68.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

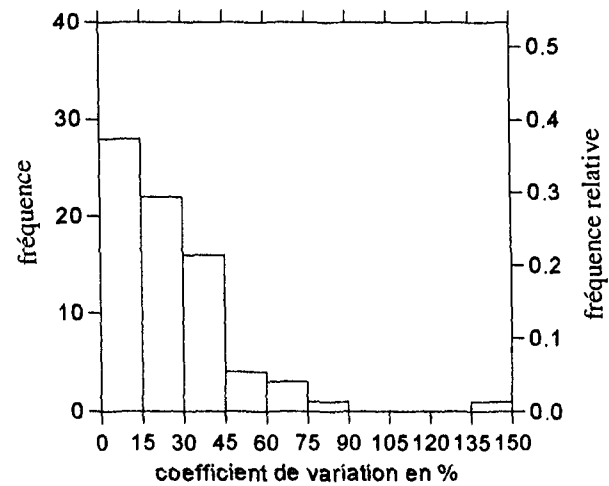


Figure 68.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

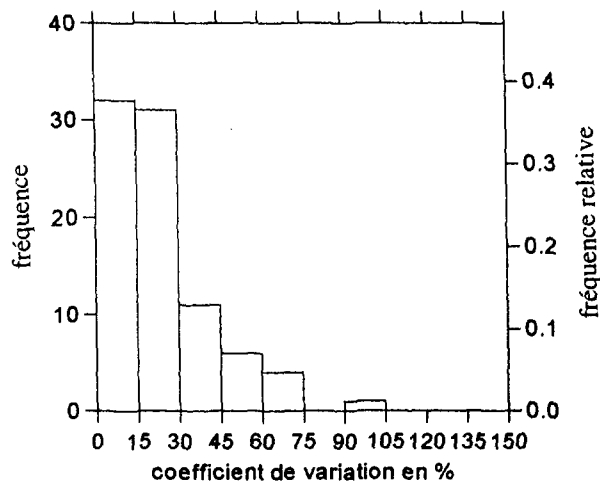


Figure 68.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

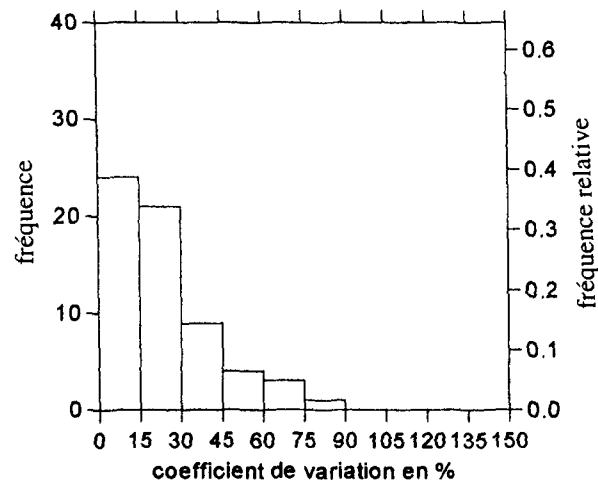


Figure 68.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 68 : Distribution du coefficient de variation de la charge de glace pendant la phase de maintien

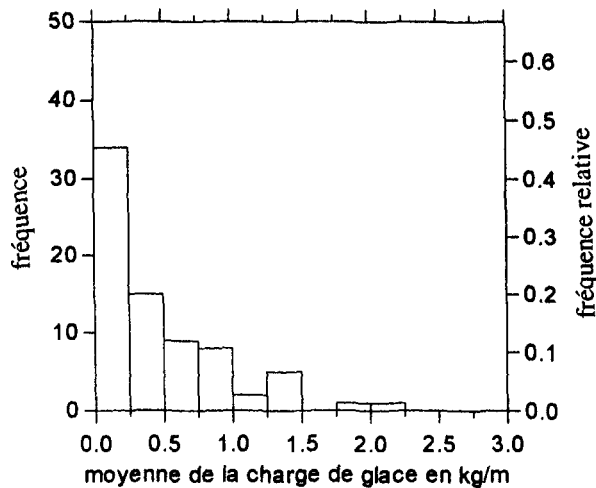


Figure 69.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

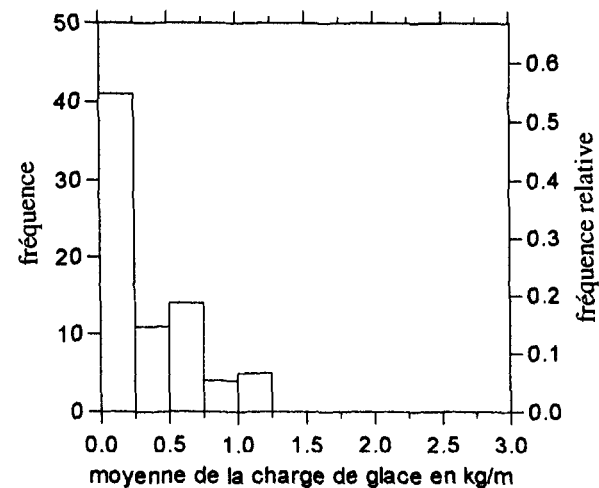


Figure 69.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

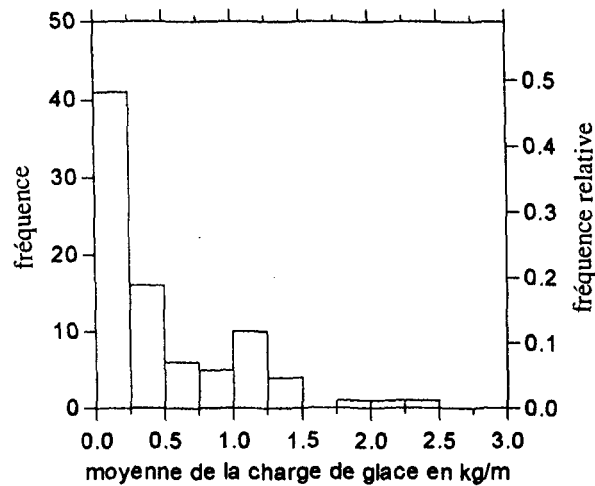


Figure 69.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

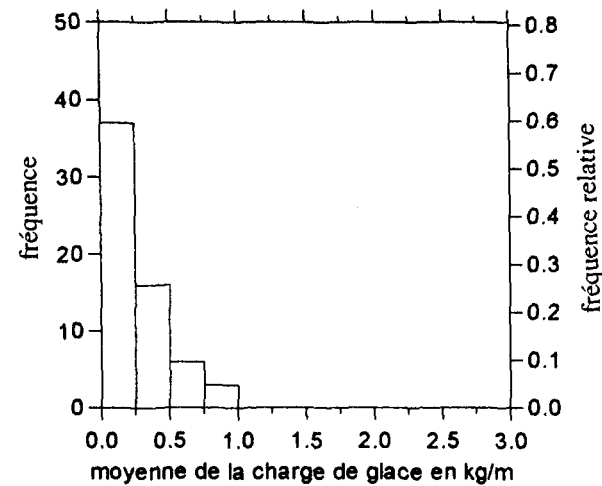


Figure 69.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 69 : Distribution de la moyenne de la charge de glace pendant la phase de maintien

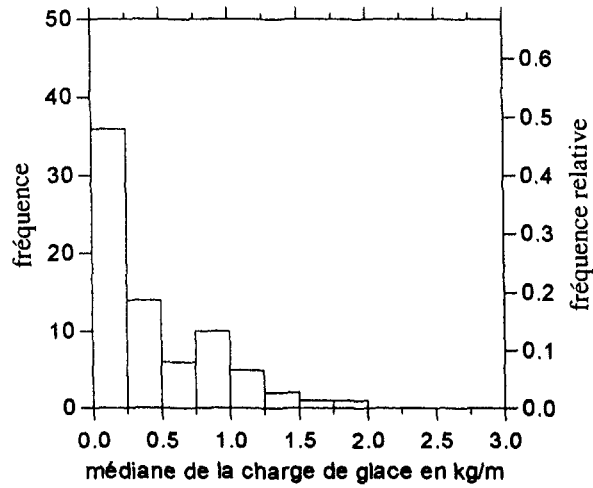


Figure 70.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

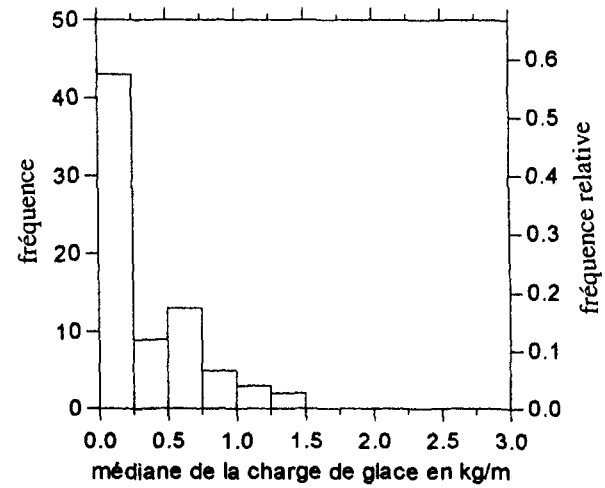


Figure 70.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

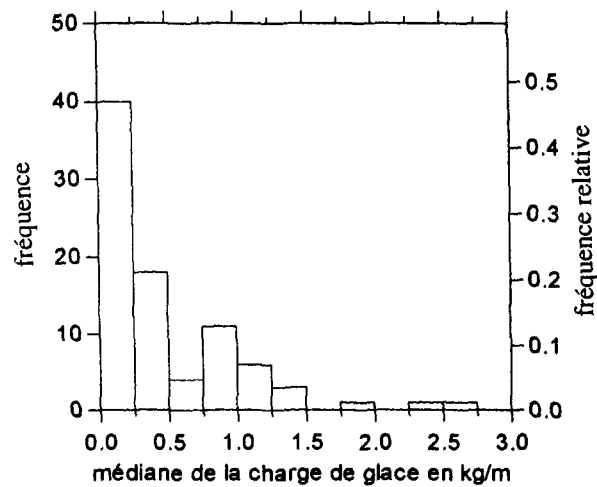


Figure 70.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

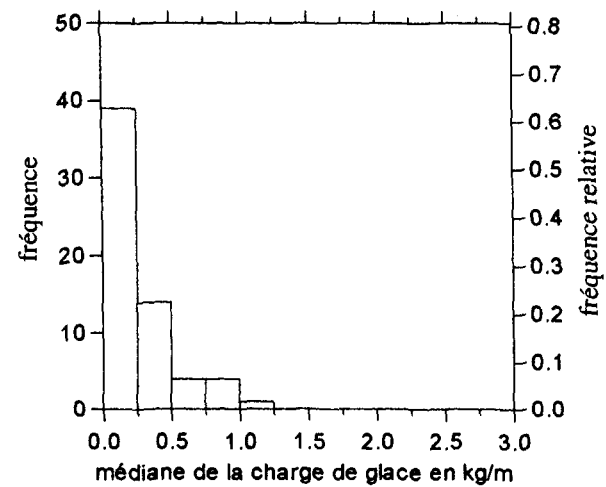


Figure 70.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 70 : Distribution de la médiane de la charge de glace pendant la phase de maintien

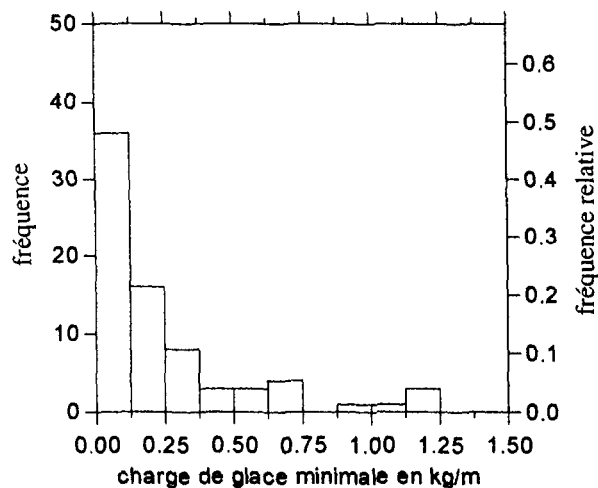


Figure 71.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

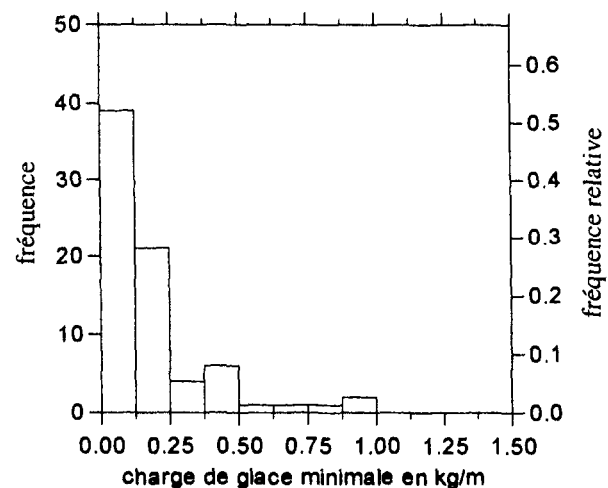


Figure 71.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

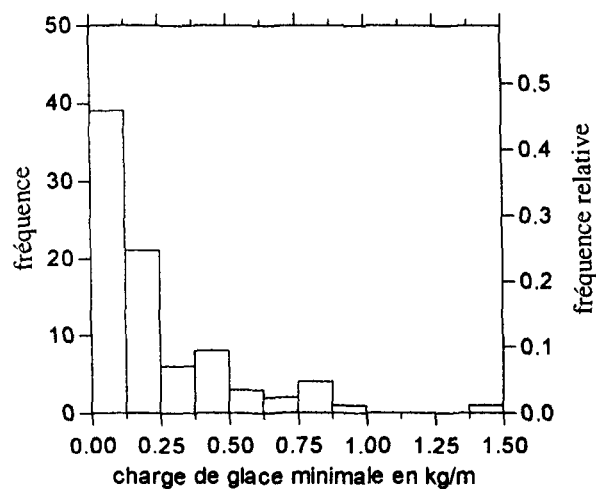


Figure 71.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

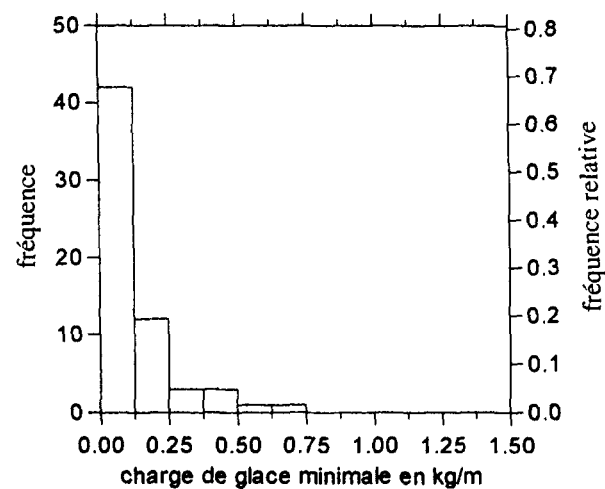


Figure 71.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 71 : Distribution de la charge de glace minimale pendant la phase de maintien

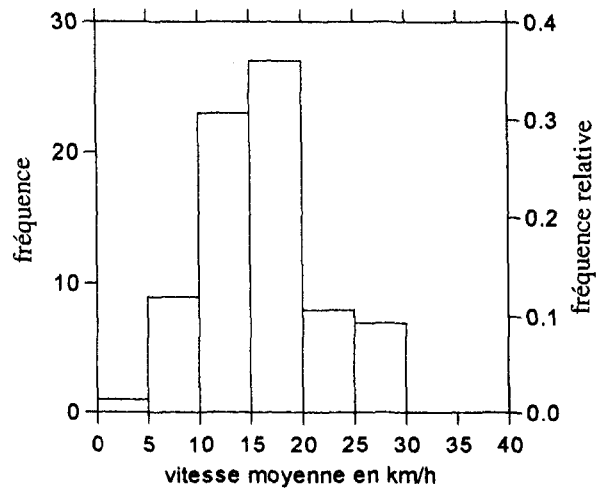


Figure 72.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

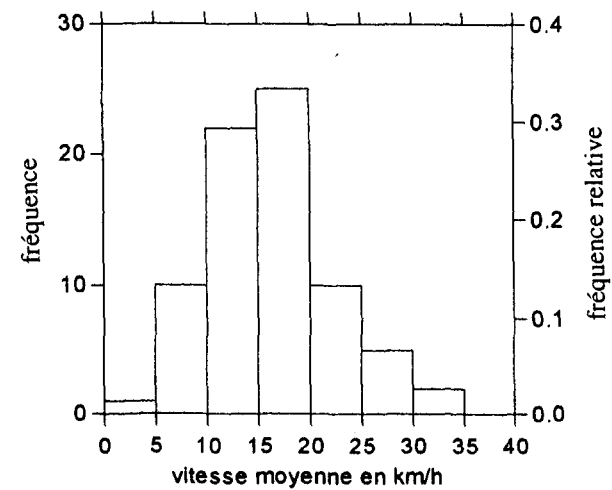


Figure 72.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

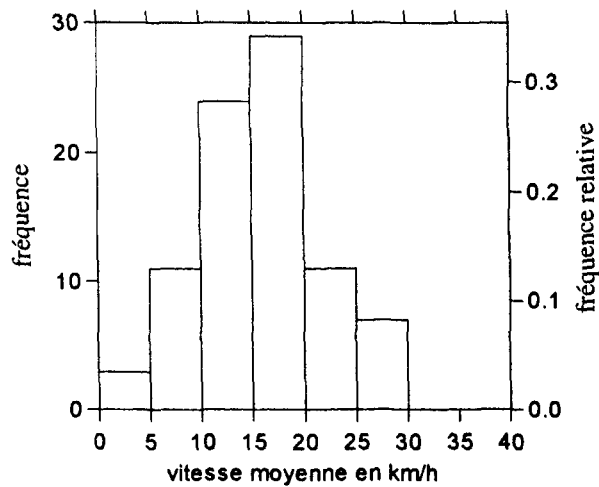


Figure 72.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

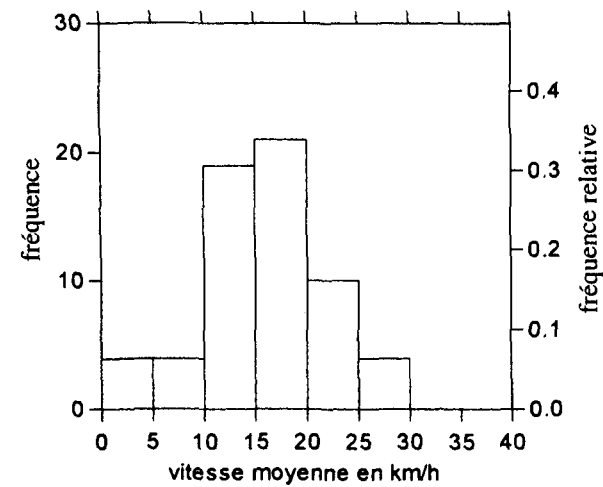


Figure 72.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 72 : Distribution de la vitesse moyenne du vent perpendiculaire pendant la phase de maintien

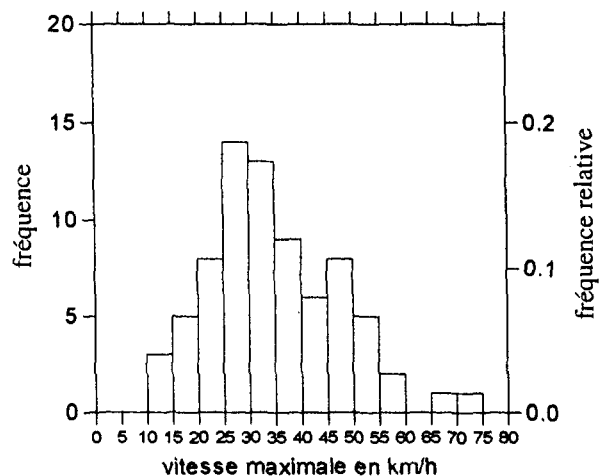


Figure 73.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

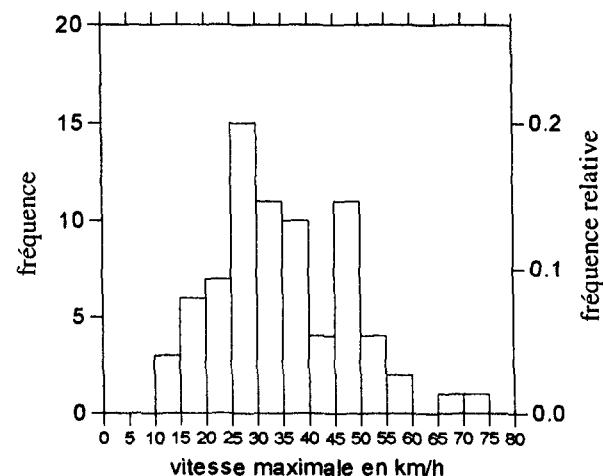


Figure 73.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

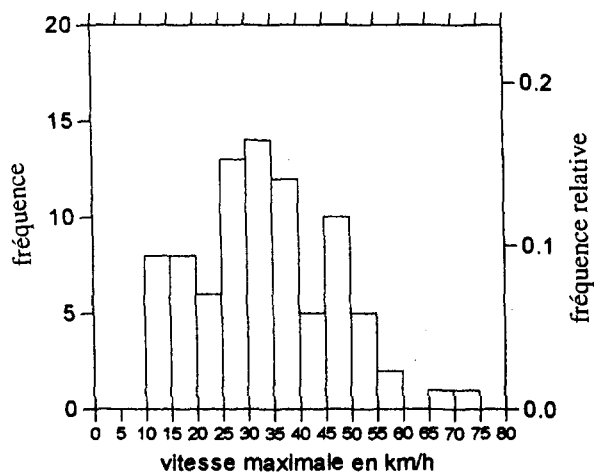


Figure 73.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

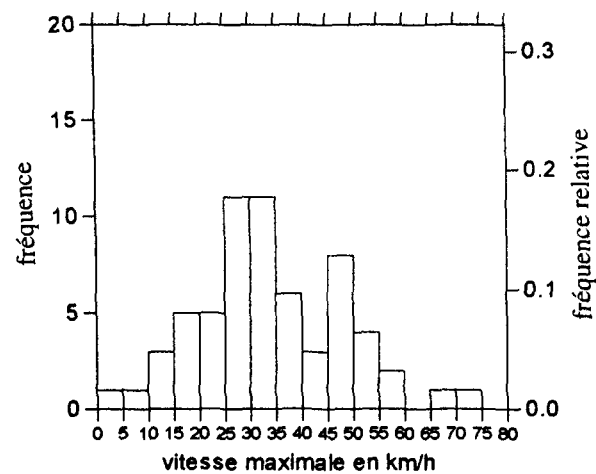


Figure 73.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 73 : Distribution de la vitesse maximale du vent perpendiculaire pendant la phase de maintien

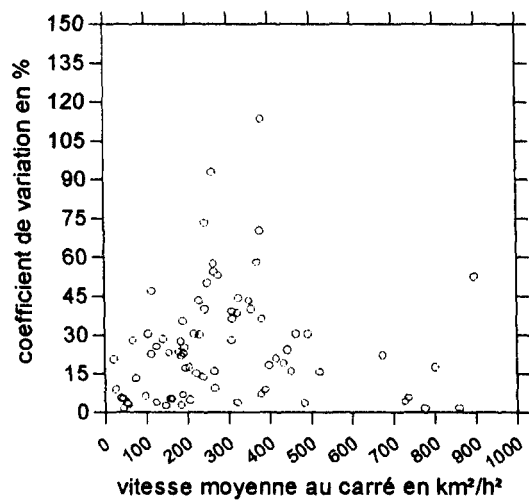


Figure 74.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

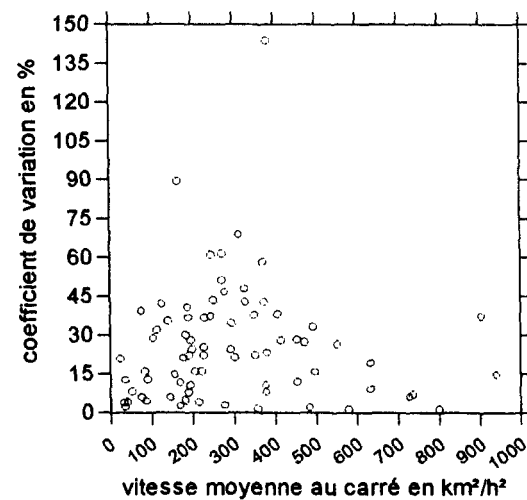


Figure 74.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

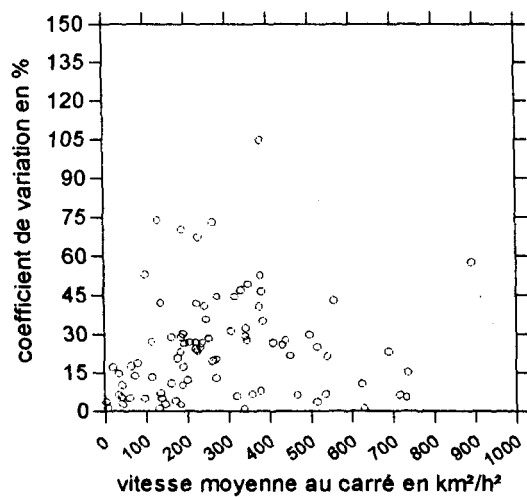


Figure 74.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

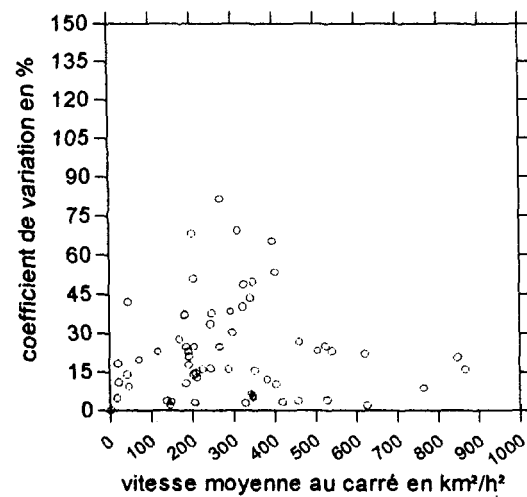


Figure 74.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 74 : Relation entre le coefficient de variation et la vitesse moyenne du vent perpendiculaire au carré

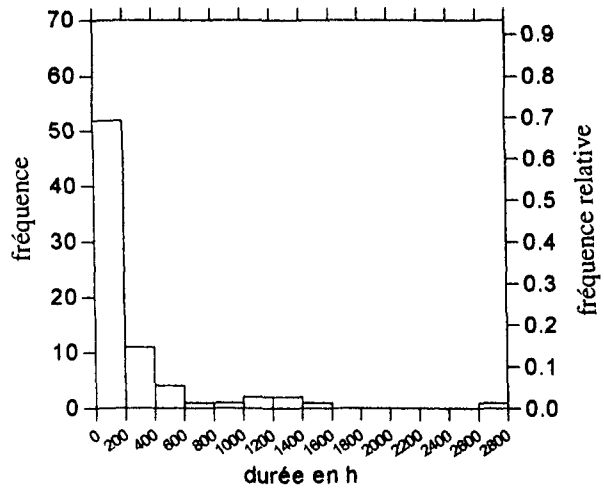


Figure 75.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

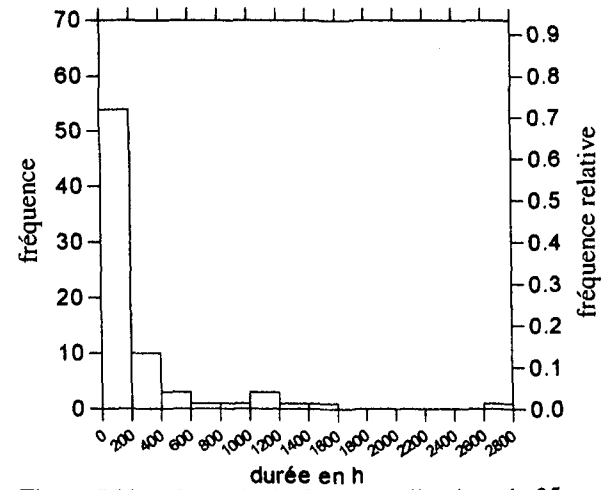


Figure 75.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

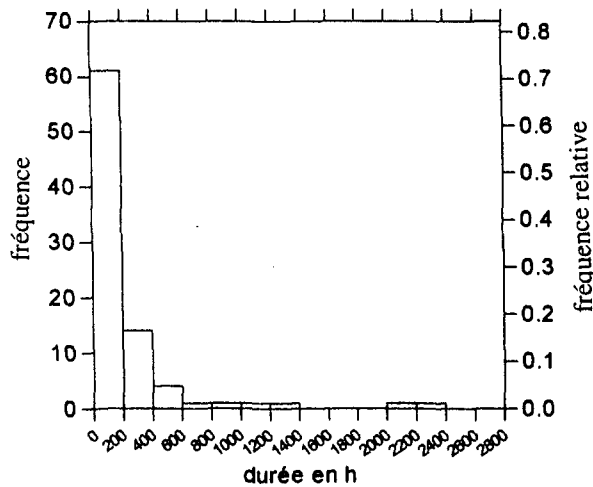


Figure 75.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

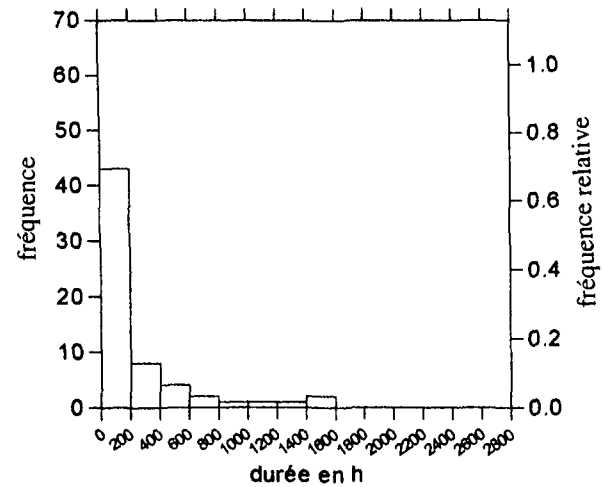


Figure 75.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 75 : Distribution de la durée de la phase de maintien en heures

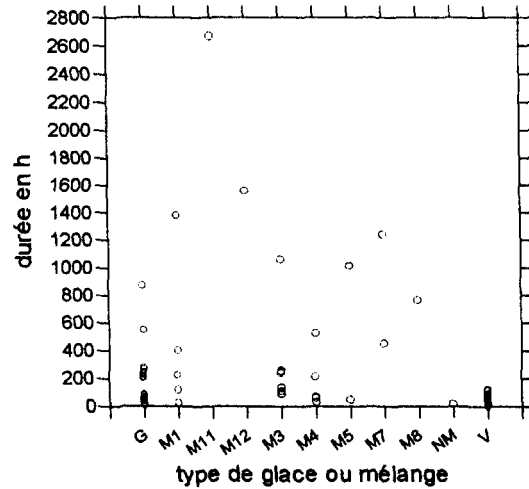


Figure 76.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

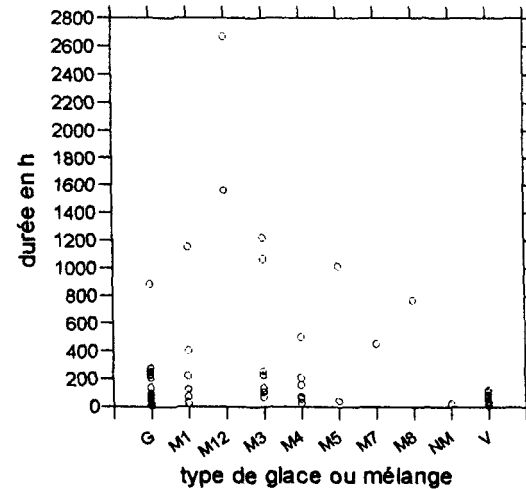


Figure 76.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

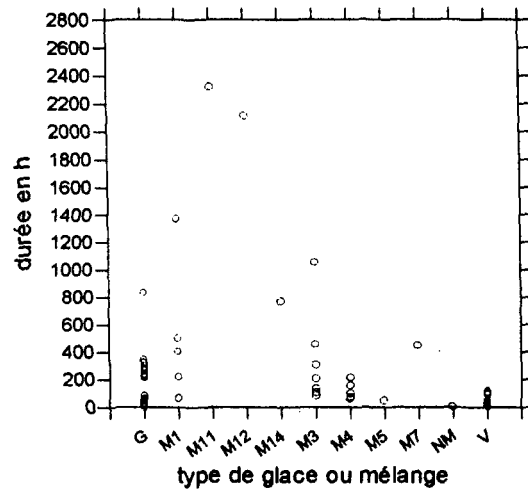


Figure 76.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

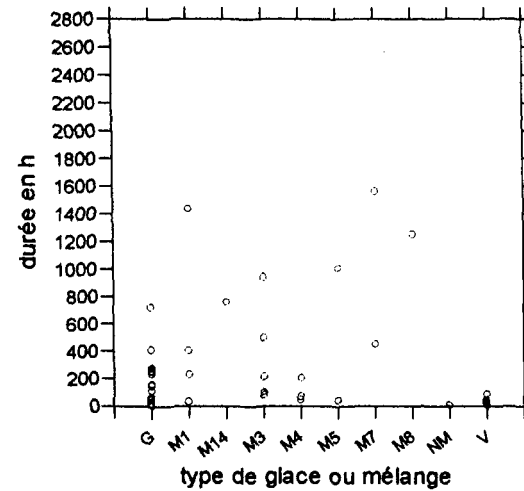


Figure 76.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 76 : Relation entre la durée de la phase de maintien et le type de glace ou mélange pendant la phase de maintien

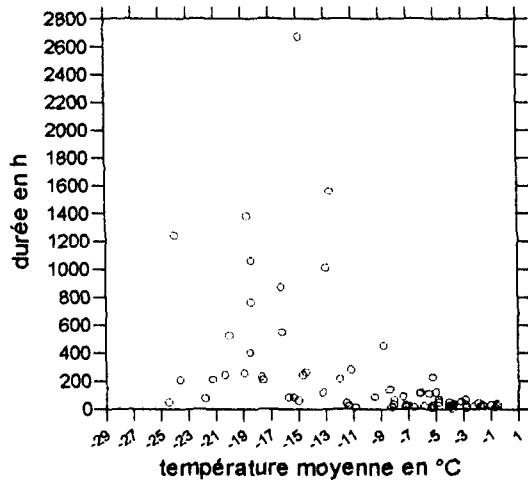


Figure 77.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

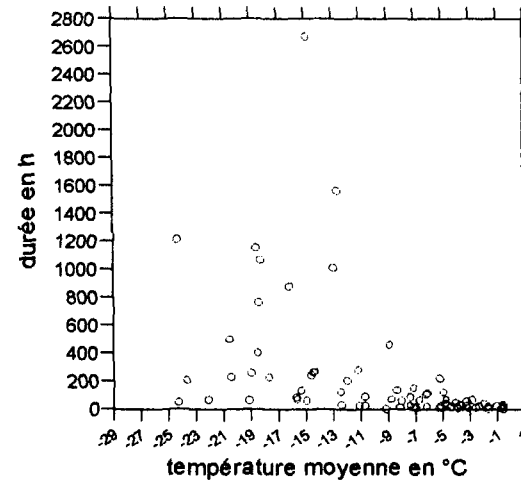


Figure 77.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

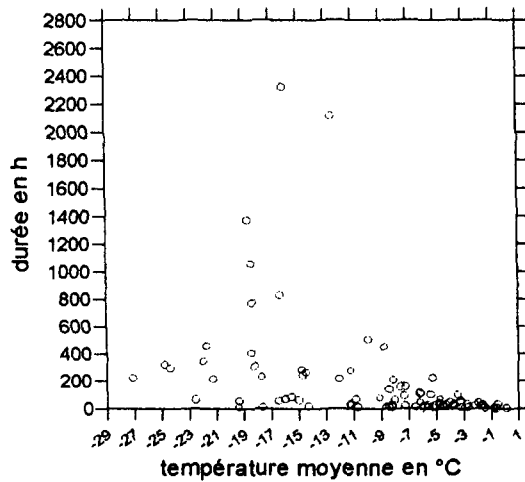


Figure 77.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

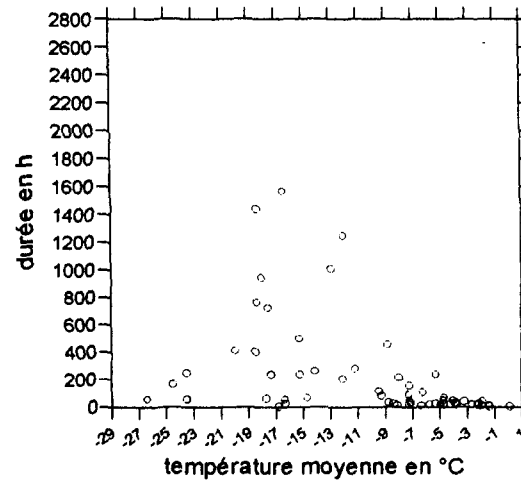


Figure 77.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 77 : Relation entre la durée de la phase de maintien et la température moyenne pendant la phase de maintien

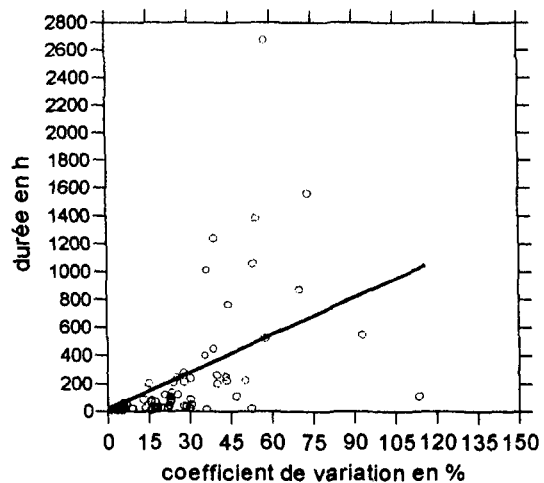


Figure 78.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

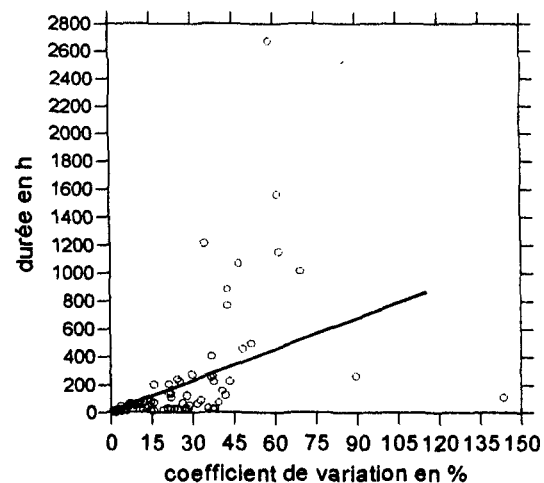


Figure 78.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

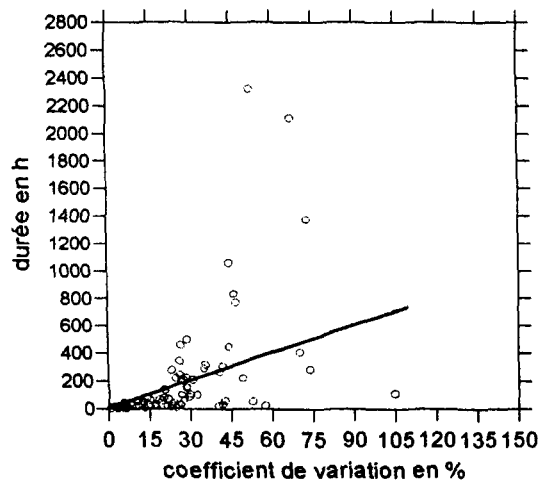


Figure 78.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

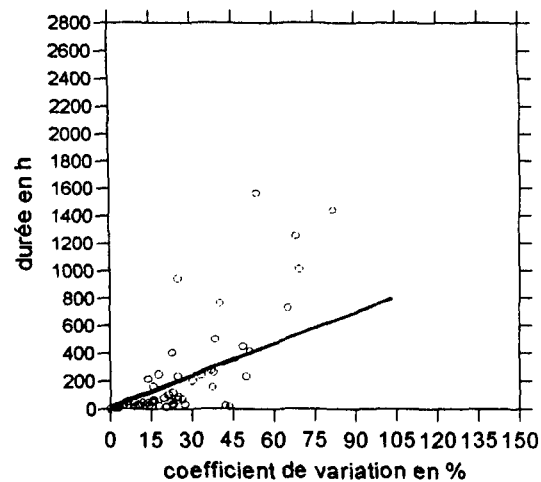


Figure 78.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 78 : Relation entre la durée de la phase de maintien et le coefficient de variation de la charge de glace pendant la phase de maintien

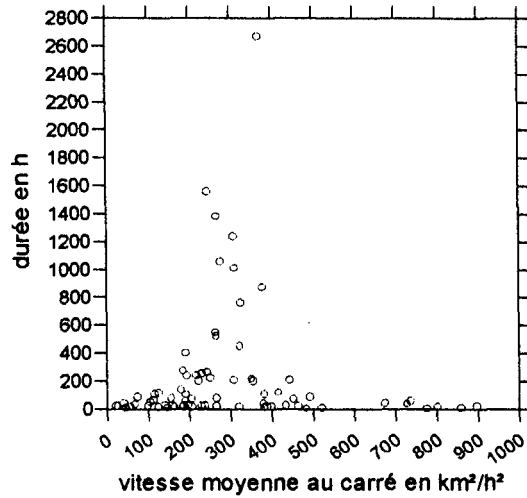


Figure 79.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

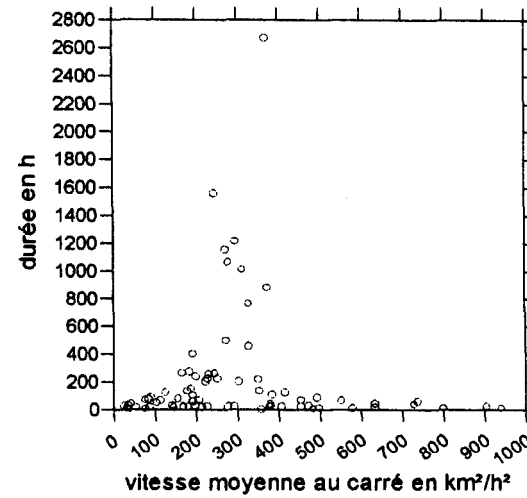


Figure 79.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

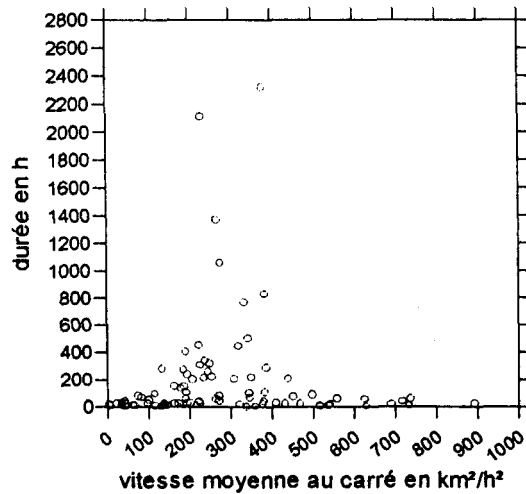


Figure 79.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

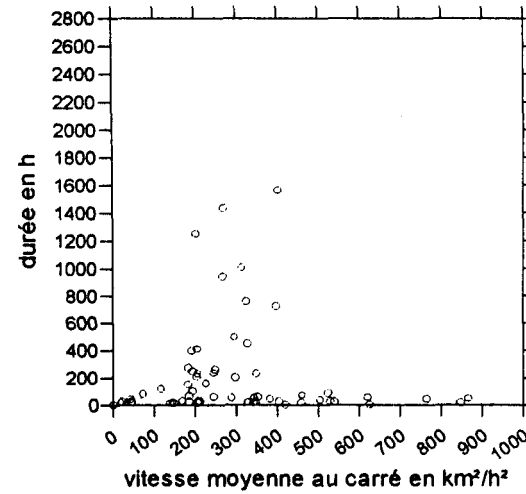


Figure 79.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 79 : Relation entre la durée de la phase de maintien et la vitesse moyenne du vent perpendiculaire au carré pendant la phase de maintien

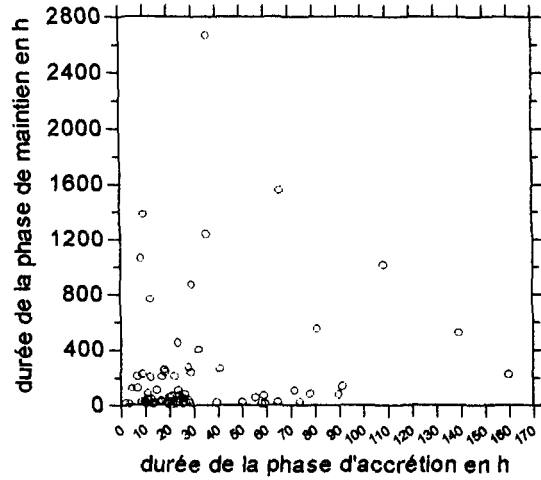


Figure 80.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

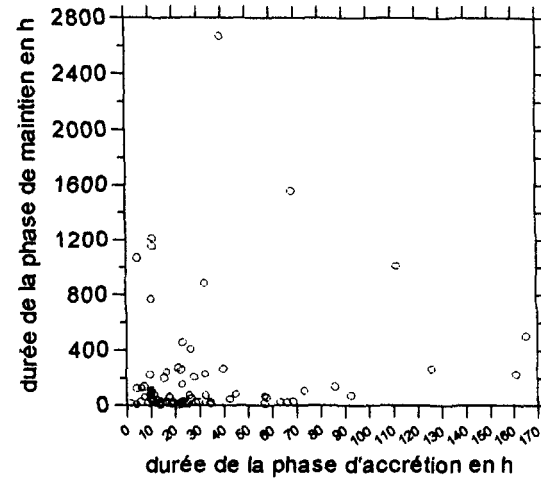


Figure 80.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

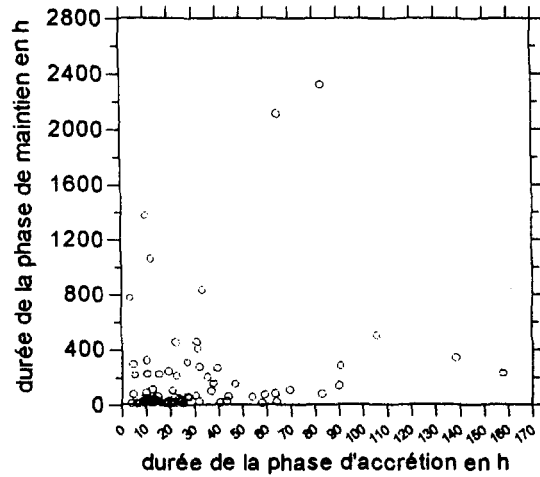


Figure 80.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

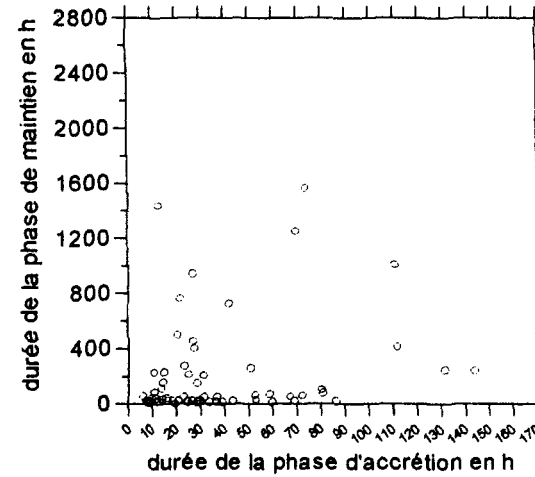


Figure 80.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

Figure 80 : Relation entre la durée de la phase de maintien et la durée de la phase d'accrétion

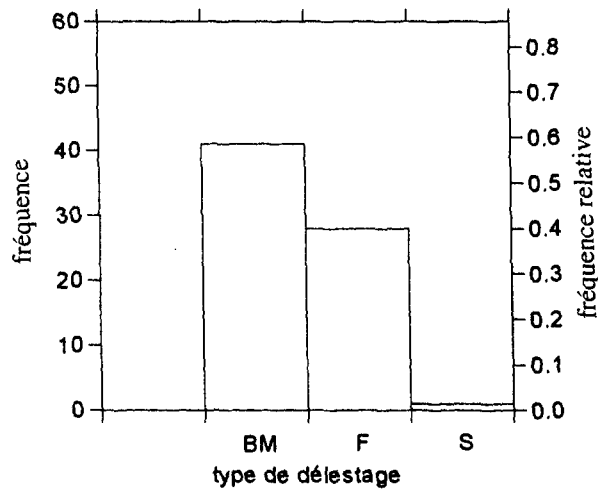


Figure 81.a : Câble Bersimis (diamètre de 35 mm)

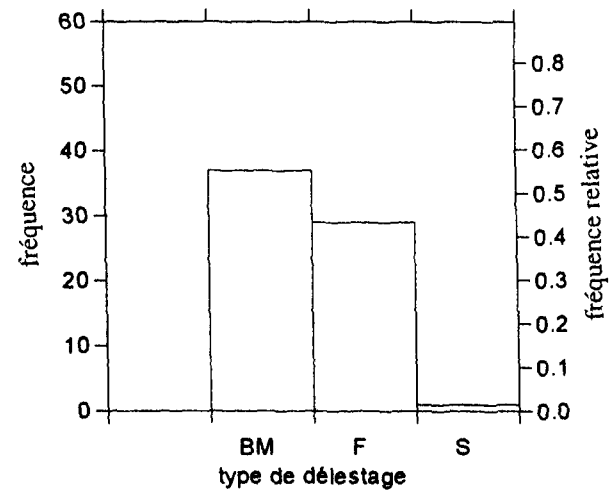


Figure 81.b : Un câble du faisceau (diamètre de 35 mm)

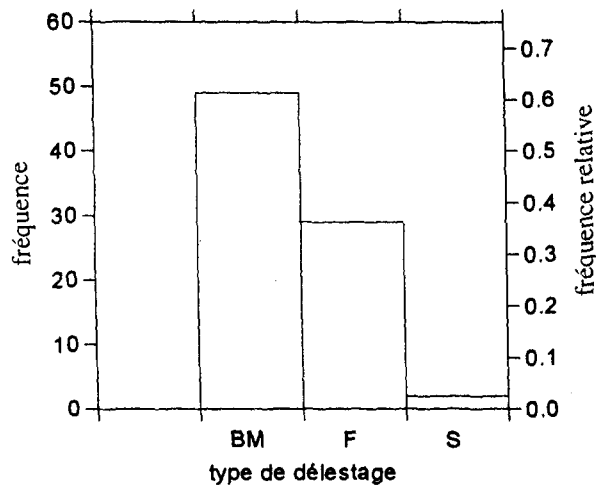


Figure 81.c : Câble de garde (diamètre de 12,5 mm)

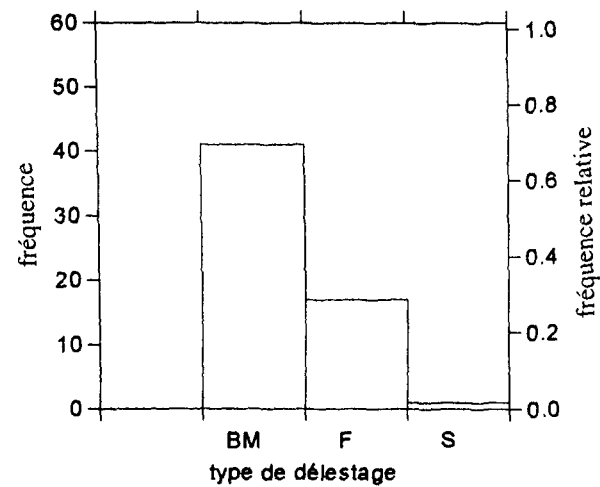


Figure 81.d : Câble témoin (diamètre de 7,93 mm)

BM : Bris mécanique

F : Fonte

S : Sublimation

Figure 81 : Distribution des types de délestage en fin de phase de maintien