

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
AU DOCTORAT EN INGÉNIERIE

PAR
AMAL BOUAMOUL

**ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET THÉORIQUE SUR LE
PROCESSUS DE DÉLESTAGE PAR FONTE DE LA GLACE
ACCUMULÉE AUTOUR D'UN CYLINDRE**

OCTOBRE 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.

RÉSUMÉ

En dépit des efforts pour modéliser l'accrétion de glace (givre et verglas) sur les diverses structures, et notamment les équipements des réseaux électriques, très peu d'études portant sur le délestage de la glace (réduction de masse de glace) ont été effectuées. Et ceci malgré l'importance de cette phase dans la conception des lignes aériennes subissant le givrage atmosphérique. En effet, la compréhension du processus de délestage est nécessaire pour l'analyse du comportement de ces structures sous l'effet du givre et du verglas et pour le choix des méthodes et protocoles de mitigation.

Cette recherche est divisée en deux grandes parties : la première est le développement d'un modèle mathématique à deux dimensions permettant de prédire la forme du manchon de glace accumulé sur un câble ainsi que le taux du délestage par fonte naturelle sous des conditions météorologiques bien définies comme la vitesse du vent, la température de l'air et l'épaisseur radiale de glace. La deuxième partie consiste à effectuer des tests en laboratoire afin de valider le modèle numérique.

La méthode des éléments finis de frontière a été utilisée dans le modèle mathématique car elle s'adapte bien au problème de changement de phase (fonte de la glace). Cette méthode est basée sur la combinaison des équations intégrales classiques et du concept de la méthode des éléments finis. La méthode des éléments finis de frontière permet d'approximer la frontière d'un domaine continu par un ensemble de sous domaines. Dans ce travail, la frontière de la glace a été discrétisée par des éléments linéaires et le domaine câble-glace par des éléments triangulaires. Grâce, à l'introduction de la fonction de Green et des conditions frontières, il a été possible de produire un système d'équations linéaires pour déterminer la distribution de la

température dans le dépôt de glace, la vitesse de fonte et la forme du manchon de glace. Finalement, le modèle mathématique développé tient compte des deux types de conditions frontières, soit Fourier et Newman.

Les échantillons de glace atmosphérique sont formés en laboratoire sous des conditions atmosphériques contrôlées. Les tests expérimentaux ont été réalisés avec les équipements de recherche de la CIGELE dont les laboratoires sont situés à l'Université du Québec à Chicoutimi. La glace formée est un givre dur dont la masse volumique est d'environ 880 kg/m^3 ; elle est formée à partir de gouttelettes surfondues emportées par un vent de vitesse moyenne égale à 5 m/s et projetées sur un cylindre lisse représentant le câble. La température de l'air dans la chambre climatique pendant la phase d'accumulation est égale à -10°C , et deux épaisseurs radiales de glace ont été formées soit 10 et 25 mm. Le diamètre volumique moyen des gouttelettes, la teneur en eau ainsi que le coefficient de captation ont été également mesurés. À l'aide de ces données, la phase d'accumulation fut caractérisée.

Les tests expérimentaux en laboratoire ont été divisés en trois parties : le délestage par fonte en absence et en présence du vent et quelques tentatives sur le délestage par sublimation. L'évaluation de la quantité de glace fondue dans le cas du délestage par fonte en absence du vent a été effectuée à l'aide d'un système de capteurs de force. Par contre, dans les deux autres cas, la quantité de glace fondue a été mesurée par pesée à l'aide d'une balance à palettes.

La vitesse de fonte observée dans le cas du délestage par fonte en absence du vent fut de l'ordre de $0,53 \text{ kg/m}^2\text{h}$. Ce résultat est valide dans le cas où la température de l'air est égale à 9°C et l'épaisseur radiale initiale est 11 mm.

Dans le cas du délestage par fonte en présence du vent, une combinaison entre trois vitesses de vent (10, 20 et 30 m/s) et deux épaisseurs radiales initiales de glace (10 et 25 mm) fut testée. La durée des expériences a été toujours fixée à 2 heures et la glace fut mesurée à chaque 30 minutes. Dans le cas où l'épaisseur radiale de glace est de 10 mm, les expériences ont montré que la vitesse de fonte passe de 1,24 à $4,04 \text{ kg/m}^2\text{h}$ lorsque la vitesse de vent varie entre 10 et 30 m/s et la température dans le tunnel réfrigéré est de l'ordre de 2°C . Ces résultats sont différents ($1,53$ et $4,35 \text{ kg/m}^2\text{h}$, respectivement) lorsque l'épaisseur radiale est égale à 25 mm.

Dans le cas du délestage par sublimation, une seule série de tests a été élaborée, soit : 10 mm et 30 m/s. La température de l'air dans le tunnel était de -15 °C et la quantité de glace sublimée est relativement faible 0,06 kg/m²h comparée au délestage par fonte.

Finalement, une comparaison entre les formes de glace obtenues expérimentalement et numériquement a permis de constater que le modèle mathématique a pu prédire la forme du manchon de glace lorsque l'épaisseur radiale de la glace est égale à 10 mm et les vitesses du vent sont (10, 20 et 30 m/s). De même, le modèle numérique a pu prédire la forme du manchon de glace lorsque l'épaisseur radiale de la glace est égale à 25 mm et les vitesses du vent sont (10 et 20 m/s). Par contre, le modèle n'est pas en mesure de prédire la forme du manchon de glace lorsque l'épaisseur radiale est égale à 25 mm et la vitesse du vent est 30 m/s.

REMERCIEMENT

Je désire remercier et témoigner ma gratitude à mon directeur de recherche Monsieur Masoud Farzaneh, Professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi et Directeur de la Chaire Industrielle CRSNG/Hydro-Québec/UQAC, sur le Givrage atmosphérique des Équipements des réseaux éLEctrique (CIGELE), d'avoir accepté de diriger ce travail. Je lui suis reconnaissante de la confiance et du soutien qu'il m'a témoignés.

Je tiens à remercier Madame Ghyslaine McClure Professeure à l'Université McGill d'avoir accepté de co-diriger ce travail. Je la remercie pour son appui et ses conseils. Ma profonde gratitude pour son encadrement et son soutien efficace.

Je voudrais remercier le Professeur Savadjiev Konstantin ainsi que le Professeur Laszlo I. Kiss, pour leurs soutiens à ce travail. Ce travail a été rendu possible par l'appui technique de Sylvain Desgagnés et Pierre Camirand. Je remercie également tous les membres du GIGELE pour l'ambiance de travail.

Finalement, je tiens à exprimer mes plus sincères sentiments à mon mari Pascal pour son support et pour son encouragement.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	iii
REMERCIEMENT	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES FIGURES.....	xiii
NOMENCLATURE	xvii
 1. INTRODUCTION.....	 1
1.1 PROBLÉMATIQUE ET CONTEXTE SCIENTIFIQUE.....	1
1.2 OBJECTIFS	3
1.3 MÉTHODOLOGIE.....	4
1.4 ORGANISATION DES CHAPITRES	4
 2. REVUE DE LITTÉRATURE	 7
2.1 THÉMATIQUES SUR LA GLACE.....	8
2.1.1 Types de glace atmosphérique	8
2.1.2 Évolution et formes des dépôts de glace sur les câbles.....	11
2.2 PHASE D'ACCUMULATION	13
2.3 PHASE DE DÉLESTAGE	14
2.3.1 Délestage par sublimation	15
2.3.2 Délestage par bris mécanique.....	18
2.3.3 Délestage par fonte.....	20
2.3.3.1 Estimation de q_n	23
2.3.3.2 Estimation de q_e	27

2.3.3.3	Estimation de q_{a-g}	28
2.3.3.4	Conductivité thermique de la glace.....	31
2.3.4	Délestage forcé.....	32
2.4	CONCLUSION	33
3.	MODÈLE MATHÉMATIQUE ET FORMULATION PAR ÉQUATION	
	INTÉGRALE	35
3.1	DÉFINITION DU PROBLÈME.....	36
3.2	CHOIX DE LA MÉTHODE DE RÉOLUTION	38
3.3	MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS DE FRONTIÈRE	40
3.4	FORMULATION INTÉGRALE	42
3.5	FORMULATION NUMÉRIQUE	48
3.5.1	Discrétisation de l'équation intégrale dans le temps.....	48
3.5.2	Discrétisation de l'équation intégrale dans l'espace	49
3.5.3	Évaluation des intégrales.....	53
3.5.4	Technique de résolution	54
3.5.5	Calcul de la vitesse de fonte.....	57
3.6	CONDITIONS AUX LIMITES.....	58
3.6.1	Conditions aux limites intérieures.....	58
3.6.2	Conditions aux limites extérieures	59
3.7	TRANSFERT DE CHALEUR EN RÉGIME HUMIDE.....	60
3.8	CONCLUSION	61
4.	RÉSULTATS NUMÉRIQUES.....	63
4.1	PARAMÈTRES DE LA MODÉLISATION	64
4.2	HYPOTHÈSES DÉPART	67
4.3	PROGRAMME INFORMATIQUE	67
4.4	VALIDATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE PAR DES SOLUTIONS	
	ANALYTIQUES	69
4.4.1	Phase de pré-fusion	69

4.4.1.1	Conditions frontière de type Neumann	70
4.4.1.2	Conditions frontière de type Fourier	73
4.4.1.3	Calcul de l'erreur relative	74
4.4.2	Phase de fusion.....	76
4.4.2.1	Calcul de l'erreur relative	78
4.5	EXEMPLES NUMÉRIQUES.....	79
4.5.1	Flux de chaleur constant sur la surface latérale de la glace	80
4.5.2	Flux de chaleur constant et perpendiculaire à un nœud situé sur la moitié supérieure de la glace.....	82
4.5.3	Flux de chaleur en fonction du temps	84
4.5.4	Flux de chaleur par convection forcée	87
4.6	CONCLUSION	90
5.	PROCÉDURE ET MONTAGE EXPÉRIMENTAL	92
5.1	LA CHAMBRE CLIMATIQUE.....	93
5.1.1	Le système d'arrosage.....	93
5.1.2	Le système de refroidissement	96
5.1.3	Le système de mise en rotation du câble.....	97
5.2	LE TUNNEL RÉFRIGÉRÉ.....	99
5.3	MESURE DE LA MASSE DE LA GLACE FONDUE	101
5.4	PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES	102
5.4.1	Phase d'accumulation.....	102
5.4.2	Phase de délestage.....	104
5.5	QUELQUES PROBLÈMES RENCONTRÉS LORS DE LA PHASE DE DÉLESTAGE	106
5.6	CONCLUSION	107
6.	LES PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES DE LA PHASE D'ACCUMULATION.....	110

6.1 PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES PERTINENTS POUR LA FORMATION DU DÉPÔT DE GLACE	111
6.1.1 Température de l'air	111
6.1.2 Vitesse du vent	112
6.1.3 Taille des gouttelettes.....	114
6.1.4 Teneur en eau	120
6.2 TYPE DE GLACE PRODUITE EN LABORATOIRE.....	122
6.2.1 Masse volumique de la glace	122
6.2.2 Forme du manchon de glace.....	123
6.2.3 Coefficient de captation	126
6.3 CONCLUSION	127
 7. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET VALIDATION DU MODÈLE	
NUMÉRIQUE	129
7.1 DÉLESTAGE PAR FONTE EN L'ABSENCE DU VENT	130
7.2 DÉLESTAGE PAR FONTE EN PRÉSENCE DU VENT	134
7.2.1 cas $\varepsilon = 10 \text{ mm}$	137
7.2.2 cas $\varepsilon = 25 \text{ mm}$	138
7.2.3 Discussion	141
7.3 DÉLESTAGE PAR SUBLIMATION	142
7.4 VALIDATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE	143
7.4 CONCLUSION	149
 8. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	151
8.1 CONCLUSIONS.....	151
8.2 RECOMMANDATIONS	154
 ANNEXES	157
RÉFÉRENCES	171

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux situés à l'intérieur du texte :

Tableau 2.1 : Paramètres météorologiques influençant la formation du givre [CEI_826, 1991]	10
Tableau 2.2 : Résultats expérimentaux sur la sublimation [Bernardin, S. (1989)]	17
Tableau 2.3 : Valeurs sélectives d'albédo.....	25
Tableau 4.1 : Paramètres physiques de la glace et du câble	64
Tableau 4.2 : Comparaison entre les temps de pré-fusion de la solution numérique et analytique	72
Tableau 4.3 : L'erreur relative moyenne commise sur le bilan d'énergie de la phase de pré-fusion.....	76
Tableau 4.4 : Comparaison entre les vitesses de fonte.....	78
Tableau 4.5 : L'erreur relative commise sur le bilan d'énergie pendant la fusion	79
Tableau 4.6 : Résultats numériques pour une épaisseur de glace de 10 mm	80
Tableau 4.7 : Résultats numériques pour une épaisseur de glace de 25 mm	80
Tableau 6.1 : Valeurs moyennes des vitesses du vent	114
Tableau 6.2 : Résumé des principales méthodes de mesure par impact	116
Tableau 6.3 : Paramètres utilisés pour le calcul de la masse volumique de la glace	122
Tableau 6.4 : Valeurs des masses volumiques mesurées	123
Tableau 7.1 : Paramètres de la phase d'accumulation (délestage sans vent).....	130
Tableau 7.2 : Caractéristiques de la phase du délestage ($V_{\text{air}} \approx 0 \text{ m/s}$)	133
Tableau 7.3 : Paramètres de la phase d'accumulation ($\varepsilon = 10 \text{ mm}$)	135
Tableau 7.4 : Paramètres de la phase d'accumulation ($\varepsilon = 25 \text{ mm}$)	135
Tableau 7.5 : Vitesses du vent et fréquences correspondantes	136

Tableau 7.6 : Résultats du délestage par fonte après 2 heures ($\epsilon = 10$ mm)	137
Tableau 7.7 : Résultats du délestage par fonte après 2 heures ($\epsilon = 25$ mm)	139
Tableau 7.8 : Paramètres des tests de la sublimation	142
Tableau 7.9 : Comparaison des résultats numériques et expérimentaux ($\epsilon=10$ mm)	144
Tableau 7.10 : Comparaison des résultats numériques et expérimentaux ($\epsilon = 25$ mm)	144

Tableaux situés en annexe :

Tableau A6.1 : Vitesse du vent en (m/s) prise directement en face des hélices pour différentes lectures du potentiomètre	161
Tableau A6.2 : Moyenne de la vitesse du vent du câble de 1,8 m (lecture 7 du potentiomètre	162
Tableau A6.3 : Moyenne de la vitesse du vent du câble de 0,86 m (lecture 7 du potentiomètre	162
Tableau A6.4 : Distribution du diamètre des gouttelettes à 20 °C	163
Tableau A6.5 : Distribution du diamètre des gouttelettes à -10 °C.....	164
Tableau A6.6 : Valeur de la teneur en eau pour chaque test.....	165
Tableau A6.7 : Valeur des paramètres qui ont servi au calcul de la teneur en eau.....	165
Tableau A6.8 : Procédé de mesure de la masse volumique de la glace	166
Tableau A6.9 : Valeurs du coefficient de captation et l'épaisseur radiale équivalente	167
Tableau A7.1 : Données de la phase du délestage par fonte ($T_{\text{air}} = 9$ °C, $V_{\text{air}} \approx 0$ m/s)	169

LISTE DES FIGURES

Figures situées à l'intérieur du texte :

Figure 2.1 : Relation entre les conditions atmosphériques et les types de glace [Kuroiwa, D. (1958)]	9
Figure 2.2 : Manchons circulaire et elliptique	12
Figure 2.3 : Caractéristiques géométriques des manchons circulaires et elliptiques	13
Figure 2.4 : Nu et θ en fonction de Re [Giedt, W.H. (1949)]	29
Figure 3.1 : Accumulation de glace cylindrique autour d'un câble	36
Figure 3.2 : Domaine d'étude câble-glace	37
Figure 3.3 : Définition de l'angle θ pour le nœud i	46
Figure 3.4 : Définition d'un élément linéaire avec numérotation des nœuds dans le sens anti-horaire	50
Figure 3.5 : Définition d'un élément triangulaire linéaire	52
Figure 4.1 : Comparaison entre différentes conductivités thermiques ($q = 100 \text{ W/m}^2$)	66
Figure 4.2 : Comparaison entre différentes conductivités thermiques ($h = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$)	66
Figure 4.3 : Organigramme du programme informatique	68
Figure 4.4 : Exemple de maillage utilisé ($\varepsilon = 10 \text{ mm}$)	69
Figure 4.5 : Comparaison entre la solution analytique et numérique de la période de pré-fusion ($q = 100 \text{ W/m}^2$)	72
Figure 4.6 : Comparaison entre la solution numérique et analytique ($V_{\text{air}} = 20 \text{ m/s}$)	74
Figure 4.7 : L'erreur relative commise sur le bilan d'énergie durant la phase de pré- fusion ($q = 100 \text{ W/m}^2$)	76
Figure 4.8 : Déplacement de la frontière et profil de température ($q = 100 \text{ W/m}^2$, $\varepsilon =$ 10 mm)	81

Figure 4.9 : Déplacement de la frontière et profil de température ($q = 100 \text{ W/m}^2$, $\varepsilon = 25 \text{ mm}$)	81
Figure 4.10 : Source de chaleur stationnaire et perpendiculaire sur le nœud (i).....	83
Figure 4.11 : Forme du manchon de glace après 6 heures ($q = 100 \text{ W/m}^2$, $\varepsilon = 10 \text{ mm}$)	84
Figure 4.12 : Moyenne des radiations solaires sur une surface inclinée de 0 degré	86
Figure 4.13 : Déplacement de la frontière de la glace à chaque heure ($\varepsilon = 10 \text{ mm}$)	86
Figure 4.14 à 4.17 : Déplacement de la frontière à chaque 30 min ($\varepsilon = 10 \text{ mm}$, $T_{\text{air}} = 2$ °C) pour différentes vitesses de l'air.....	88
Figure 4.18 : Évolution des températures câble-glace et de la surface de la glace en fonction du temps ($V_{\text{air}} = 10 \text{ m/s}$, $\varepsilon = 10 \text{ mm}$)	89
Figure 4.19 : Variation de l'épaisseur de glace à différentes vitesses de vent	89
Figure 5.1 : Système d'arrosage	94
Figure 5.2 : Profil du convergent	95
Figure 5.3 : Circuit d'alimentation en eau et en air des gicleurs	96
Figure 5.4 : Système de mise en rotation du câble.....	98
Figure 5.5 : Câble sectionné en deux	98
Figure 5.6 : Vue d'ensemble du tunnel	99
Figure 5.7 : Section des tests dans la chambre du tunnel.....	100
Figure 5.8 : Déformation totale des capteurs de force	102
Figure 5.9 : Solution adoptées pendant la phase du délestage	107
Figure 6.1 : Traces des gouttelettes laissées sur une lamelle	117
Figure 6.2 : Spectre des gouttelettes à 20 °C.....	119
Figure 6.3 : Spectre des gouttelettes à -10 °C	119
Figure 6.4 : Accumulation cylindrique et coupe transversale.....	124
Figure 6.5 : Variation de l'épaisseur radiale de la glace en fonction du temps (câble 0,86 m).....	125
Figure 7.1 : Évaluation de l'épaisseur radiale de glace (câble de 1,8 m)	131
Figure 7.2 : Évaluation dans le temps des températures de l'air et de la glace	132
Figure 7.3 : Décroissance de la masse de glace en fonction du temps	133
Figure 7.4 : Évaluation du % de glace fondue ($\varepsilon = 10 \text{ mm}$)	137

Figure 7.5 : Formes des manchon de glace après 2 heures de fonte ($\varepsilon = 10$ mm)	138
Figure 7.6 : Évaluation du % de glace fondue ($\varepsilon = 25$ mm)	139
Figure 7.7 : Formes des manchon de glace après 2 heures de fonte ($\varepsilon = 25$ mm)	140
Figure 7.8 : Relation entre la vitesse de fonte et la vitesse du vent ($T_{\text{air}} = 2$ °C).....	140
Figure 7.9 : Autres formes de glace obtenues après 2 heures de fonte ($\varepsilon = 25$ mm)	141
Figure 7.10 : Évolution du % de la glace sublimée.....	143
Figure 7.11 : Forme de glace obtenue numériquement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 30$ m/s, $T_{\text{air}} = 2$ °C, $\varepsilon = 10$ mm)	146
Figure 7.12 : Forme de glace obtenue numériquement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 20$ m/s, $T_{\text{air}} = 2$ °C, $\varepsilon = 10$ mm)	146
Figure 7.13 : Forme de glace obtenue expérimentalement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 30$ m/s, $T_{\text{air}} = 2$ °C, $\varepsilon = 10$ mm)	146
Figure 7.14 : Forme de glace obtenue expérimentalement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 20$ m/s, $T_{\text{air}} = 2$ °C, $\varepsilon = 10$ mm)	146
Figure 7.15 : Forme de glace obtenue numériquement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 10$ m/s, $T_{\text{air}} = 2$ °C, $\varepsilon = 10$ mm)	147
Figure 7.16 : Forme de glace obtenue numériquement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 10$ m/s, $T_{\text{air}} = 2$ °C, $\varepsilon = 25$ mm)	147
Figure 7.17 : Forme de glace obtenue expérimentalement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 10$ m/s, $T_{\text{air}} = 2$ °C, $\varepsilon = 10$ mm)	147
Figure 7.18 : Forme de glace obtenue numériquement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 10$ m/s, $T_{\text{air}} = 2$ °C, $\varepsilon = 25$ mm)	147
Figure 7.19 : Forme de glace obtenue numériquement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 20$ m/s, $T_{\text{air}} = 2$ °C, $\varepsilon = 25$ mm)	148
Figure 7.20 : Forme de glace obtenue numériquement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 30$ m/s, $T_{\text{air}} = 2$ °C, $\varepsilon = 25$ mm)	148
Figure 7.21 : Forme de glace obtenue expérimentalement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 20$ m/s, $T_{\text{air}} = 2$ °C, $\varepsilon = 25$ mm)	148

Figure 7.22 : Forme de glace obtenue expérimentalement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 30$ m/s, $T_{\text{air}} = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 25\text{ mm}$)	148
---	-----

Figures situées en annexe :

Figure A4.1 : $\varepsilon = 10\text{ mm}$, $q = 50\text{ W/m}^2$	158
Figure A4.2 : $\varepsilon = 10\text{ mm}$, $q = 200\text{ W/m}^2$	158
Figure A4.3 : $\varepsilon = 10\text{ mm}$, $q = 500\text{ W/m}^2$	159
Figure A4.4 : $\varepsilon = 25\text{ mm}$, $q = 50\text{ W/m}^2$	159
Figure A4.5 : $\varepsilon = 25\text{ mm}$, $q = 200\text{ W/m}^2$	160
Figure A4.6 : $\varepsilon = 25\text{ mm}$, $q = 500\text{ W/m}^2$	160
Figure A6.1 : Vitesse moyenne du vent en face des hélices en fonction de la position du potentiomètre calculée par la méthode de Simpson	161

NOMENCLATURE

a_n	racines positives de la fonction de Bessel	
Bi	nombre de Biot	
C_p	chaleur spécifique	J/kg K
C_s	concentration de vapeur	kg/m ³
D	diamètre extérieur de l'impact d'une gouttelette	m
D	diamètre global du câble enrobé de glace	m
D_{va}	coefficient de diffusion vapeur - eau	m ² /s
d_c	diamètre du câble	m
E	coefficient de captation	
E	débit massique de la vapeur d'eau	Kg/m ² s
$E_{absorbé}$	énergie absorbée par la glace	W/m ²
$E_{fournie}$	énergie fournie pour la glace	W/m ²
e_a	pression de la vapeur d'eau	Pa
e_s	pression de la vapeur d'eau saturante	Pa
f	nombre d'incrémentes nécessaire à la simulation	
G^*	fonction de Green	
g	gravité	m ² /s
H	humidité relative	%
h	coefficient de convection entre la glace et l'air	W/m ² K
I	courant électrique	A
k	conductivité thermique	W/m K
L	chaleur latente de fusion de la glace	J/kg
L	longueur du cylindre rotatif	m
L_c	chaleur latente de condensation (= 2,49 E ⁶)	J/kg
L_e	chaleur latente d'évaporation (= 2,83 E ⁶)	J/kg
l_i	longueur de l'élément Γ_i	m
M	nombre des éléments triangulaires discrétisant le domaine Ω	
\vec{m}_i	vecteur de déplacement du nœud i	
m_g	masse de la glace accumulée sur le cylindre	kg
N	nébulosité	
N	nombre d'éléments discrétisant la frontière Γ	
Nu	nombre de Nusselt	
\vec{n}	vecteur unitaire normal à la frontière Γ	
Pr	nombre de Prandtl	
p	pression atmosphérique	Pa

p_v	pression partielle de la vapeur d'eau	Pa
q	flux de chaleur	W/m ²
q_a	radiations infrarouges totales	W/m ²
q_{a-g}	flux de chaleur par convection	W/m ²
q_e	flux de transfert d'humidité	W/m ²
q_n	flux total des radiations solaires	W/m ²
R	résistance électrique du câble	Ω
R	module du vecteur \vec{R}	m
R_0	radiations solaires incidentes totales	W/m ²
R^2	domaine fermé	
Ra	nombre de Rayleigh	
Re	nombre de Reynolds	
R_v	constante des gaz parfaits	J/kg K
r_i	rayon initial du cylindre rotatif	m
r	rayon de l'accumulation	m
\vec{r}	vecteur position du point (x,y)	
\vec{r}_o^L	vecteur position du centre de gravité du $L^{ème}$ triangle	
$\vec{r}_{oj}(\xi)$	ensemble des vecteurs décrivant l'élément Γ_j	
\vec{r}_o	vecteur observateur du point (x_o, y_o)	
Sc	nombre de Schmidt	
$\Delta S(\vec{r}_o^i)$	longueur du déplacement du $i^{ème}$ nœud	m
$\frac{d\vec{S}(\vec{r})}{dt}$	vitesse de fonte de la glace	m/s
T_{air}	température de l'air	K
$T(\vec{r}, \tau)$	température au point \vec{r} au temps τ	K
T_f	température de fusion	K
t	temps	s
t_f	temps final de la simulation	s
Δt_s	intervalle de temps entre t_s et t_{s-1}	s
$u(t-\tau)$	fonction échelon-unité	
V	vitesse du vent	m/s
w	teneur en eau	kg/m ³
(x,y)	coordonnées cartésiennes	
(x_o, y_o)	coordonnées cartésiennes	

Symboles grecs

α	albédo de la glace	
α	diffusivité thermique	m/s ²
β	coefficient d'expansion de l'air	K ⁻¹

γ	constante d'Euler	
Γ	frontière du domaine d'étude	
∇	gradient	
∇^2	laplacien	
$\delta_{i,j}$	indice de Kronecker	
δ	épaisseur de la couche limite	m
ε	quantité infinitésimal de temps	s
θ	angle	rad
ν	viscosité cinématique	m ² /s
ρ	masse volumique	kg/m ³
σ	constante de Stephane	W/m ² K ⁴
τ	temps	s
τ_f	taux de fonte	kg/m ² s
τ_s	taux de sublimation	kg/m ² s
τ_a	coefficient de diffusion propre à l'atmosphère	
τ_n	coefficient de transmissivité des nuages	
Φ_l	fonctions d'interpolation linéaire	
$\varphi(\vec{r})$	coefficient dépendant de la localisation de l'observateur	
Ω	domaine d'étude à l'instant t	

Indices et symboles particuliers

c	indice du câble
g	indice de la glace
i	$i^{ème}$ nœud de la frontière
j	$j^{ème}$ nœud de la frontière
L	$L^{ème}$ triangle du domaine
o	coordonnées relatives au vecteur \vec{r}_o
ν	indice de la vapeur
$\frac{\partial}{\partial n}$	dérivée partielle suivant la direction du vecteur \vec{n}
$\frac{\partial}{\partial t}$	dérivée partielle par rapport au temps
$\ \quad \ $	norme d'un vecteur
$[\quad]$	matrice
$—$	moyenne d'un paramètre

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 PROBLÉMATIQUE ET CONTEXTE SCIENTIFIQUE

La construction de lignes aériennes de transport d'énergie électrique à travers le Canada a fait ressortir les problèmes causés par l'accumulation de la glace formée sur les ouvrages exposés. Comme dans plusieurs autres pays nordiques, la glace atmosphérique impose des lourdes surcharges aux lignes de transport d'énergie électrique. Ces lignes sont exposées au froid pendant plusieurs mois chaque année et doivent parcourir des centaines de kilomètres pour assurer un service à la population. Afin de réduire les dommages potentiels du verglas sur les lignes, des études sur l'accumulation et sur le délestage de la glace accumulée autour des câbles et conducteurs sont réalisées. En janvier 1998, le verglas qui a tombé sur le Québec a provoqué une véritable désolation. Depuis ce temps,

de plus en plus de compagnies d'électricité et de câbles s'intéressent de près aux études effectuées dans le domaine du givrage atmosphérique des lignes aériennes.

Les accumulations de glace autour des câbles et conducteurs sont principalement causées par la pluie verglaçante, les nuages et le brouillard givrant, la neige fondante et la condensation. Ces dépôts de glace sont à l'origine de nombreux problèmes comme les surcharges mécaniques sur les supports et accessoires, la réduction des dégagements électriques phase/phase ou phase/masse due aux flèches importantes, les vibrations attribuables aux forces aérodynamiques, la fatigue et la rupture des conducteurs. De nombreuses études et publications ont été réalisées dans chacun de ces domaines. Par contre, peu d'études ont été consacrées au délestage (réduction de la masse de glace), même si ce dernier est responsable de plusieurs accidents. Par exemple, la décharge complète ou partielle d'une portée peut causer un déséquilibre des forces aérodynamiques et par conséquent, d'importants dommages aux conducteurs, aux câbles et aux accessoires. De même, le délestage soudain d'un conducteur peut provoquer un déplacement d'amplitude suffisamment grande pour que ce dernier touche d'autres conducteurs, provoquant ainsi un court-circuit.

La complexité du phénomène du délestage rend son étude confuse car plusieurs disciplines interviennent. Effectivement, les délestages par fonte et par sublimation sont directement liés aux propriétés thermodynamiques de la glace, alors que le délestage par bris mécanique est entièrement déterminé par les conditions rhéologiques de la glace et par les facteurs météorologiques. Toute étude pertinente dans le domaine du délestage doit être basée non seulement sur la modélisation numérique en utilisant des ordinateurs et de

logiciels de calculs, mais aussi sur des travaux en laboratoire et l'analyse de données de givrage provenant de sites naturels. L'originalité de cette étude c'est qu'elle contribue à l'avancement des connaissances dans un domaine crucial de recherche encore inexploité qui est le délestage.

1.2 OBJECTIFS

Les objectifs de cette recherche sont : premièrement, la réalisation d'une étude sur les différents mécanismes qui influencent le délestage naturel par fonte. Deuxièmement, construire un modèle mathématique qui servira à la simulation numérique de ce type de délestage. Le modèle permettra de prédire la forme du manchon de glace et le taux du délestage. Et finalement, mener des expériences en laboratoire afin de valider le modèle numérique. Dans cette perspective, les objectifs spécifiques sont : fournir une revue complète, dans la mesure du possible, des diverses études effectuées dans le domaine du délestage. Choisir une méthode de calcul numérique qui s'adapte bien aux problèmes de changement de phase (glace/eau et glace/vapeur). Écrire un programme informatique pour modéliser et simuler la fonte d'un dépôt de glace accumulée autour d'un câble et cela sous différentes conditions climatiques (vent, température et radiations solaires et infrarouges). Construire deux montages expérimentaux en laboratoire pour la phase d'accumulation et la phase de délestage. Les montages expérimentaux doivent permettre l'accumulation de vrais échantillons de glace atmosphérique ainsi que le délestage sous des conditions météorologiques semblables à ceux en nature.

1.3 MÉTHODOLOGIE

Une étude théorique des différents mécanismes qui entraînent le délestage naturel par fonte de la glace accumulée autour des câbles et des conducteurs a été effectuée afin d'acquérir une meilleure compréhension de ces phénomènes. Différents paramètres furent identifiés afin de caractériser le délestage par fonte. Ces paramètres sont la température de l'air, la vitesse du vent, les radiations solaires et infrarouges et la forme du dépôt de glace. En ce qui concerne la modélisation mathématique du délestage par fonte, la méthode des éléments finis de frontière fut utilisée et le modèle numérique est bidimensionnel. La modélisation du phénomène de changement de phase nécessite la maîtrise de cette méthode, de l'équation de transfert de chaleur par conduction ainsi que des types de conditions frontières. Finalement, la validation des résultats numériques nécessite la mise en place d'un montage expérimental en laboratoire.

1.4 ORGANISATION DES CHAPITRES

Au chapitre 2, la revue de littérature est présentée. On y trouve les types de glace atmosphérique, l'évolution et les formes des dépôts de glace sur les câbles et conducteurs, les types de délestage ainsi qu'un bilan d'énergie détaillé concernant le délestage par fonte. Au chapitre 3, les équations mathématiques utiles pour examiner le changement de phase de la glace, la méthode des éléments finis de frontière ainsi que la formulation numérique sont décrits. Ce chapitre contient également les types de conditions aux limites. Le

chapitre 4 est consacré aux résultats numériques obtenus par simulations. Les chapitres 5 et 6 sont réservés respectivement au montage expérimental ainsi qu'aux caractéristiques de la glace obtenue en laboratoire. Dans le chapitre 7 sont introduits les résultats expérimentaux des délestages par fonte en présence et en l'absence du vent et le délestage par sublimation ainsi que la validation du modèle numérique. Finalement, le dernier chapitre présente les conclusions ainsi que les recommandations pour des travaux futures connexes à la recherche.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Une étude théorique des différents mécanismes qui entraînent le délestage de la glace accumulée autour des câbles et conducteurs de transport d'énergie électrique a été effectuée afin d'acquérir une meilleure compréhension de ces phénomènes. Un rappel des différents types de glace est présenté au paragraphe (§2.1.1) ainsi que les étapes d'évolution d'un manchon de glace autour d'un câble (§2.1.2). Trois différents types de délestage existent à l'état naturel : le délestage par sublimation (§2.3.1), par bris mécanique (§2.3.2) et par fonte (§2.3.3). Chacun est caractérisé par des paramètres météorologiques bien définis. Dans le cas du délestage par fonte, les flux de chaleur qui peuvent entrer en considération sont : les radiations solaires et infrarouges (§2.3.3.1), le flux de chaleur par évaporation de l'eau (§2.3.3.2) et le flux de chaleur par convection forcée ou naturelle (§2.3.3.3).

2.1 THÉMATIQUES SUR LA GLACE

2.1.1 Types de glace atmosphérique

Selon les paramètres météorologiques, plusieurs types de glace atmosphérique peuvent être observés. Certains de ces paramètres ont une influence directe sur le type de glace formée. Ce sont : la température de l'air, la vitesse du vent, le diamètre des gouttelettes et la teneur en eau. La modification de l'un de ces paramètres influence la densité, l'apparence et l'adhésion de la glace. Pareillement, d'autres paramètres comme l'humidité de l'air ou la nature de l'obstacle peuvent changer les caractéristiques de la glace formée.

On distingue habituellement trois types de phénomènes susceptibles d'entraîner des surcharges importantes sur les conducteurs par dépôt de glace et formation de manchons. Le premier est le givre qui résulte de la congélation par l'impact de minuscules gouttelettes d'eau surfondue (brouillard, nuages) en suspension dans l'air. Si la température du conducteur est en dessous de -5°C , les gouttelettes se congèlent rapidement en laissant entre elles des espaces d'air. Le givre est alors nommé givre léger, et sa densité est inférieure à 0,6. Si la surface d'impact se rapproche de 0°C , la congélation est lente et les gouttelettes peuvent pénétrer dans les interstices des gouttelettes avant de geler et le givre est alors du givre lourd. Sa densité varie entre 0,6 et 0,9 et il possède une grande force d'adhésion [CEI-826, (1991)].

Le second phénomène, le verglas est un dépôt de glace provenant de la congélation de gouttes de pluie ou de bruine. À la rencontre d'un obstacle, ces gouttes gèlent lentement et

l'eau liquide a le temps de combler les espaces entre les particules de glace pour former un dépôt transparent et homogène de densité de l'ordre de 0,9. Par conséquent, il adhère bien aux structures [Gland, H. (1984), CEI-826, (1991)].

Le troisième phénomène est l'accrétion de flocons de neige collante, qui est un mélange de trois phases : glace, air saturé en vapeur d'eau et eau liquide. La neige collante a aussi la propriété d'adhérer fortement aux structures, mais, elle est rarement détectée [Denaud, V. et P. Guillot (1984)].

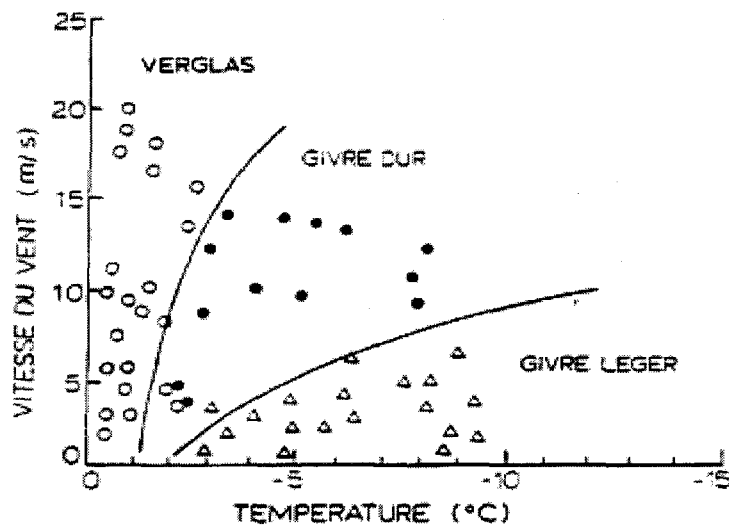


Figure 2.1 : Relation entre les conditions atmosphériques et les types de glace [Kuroiwa, D. (1958)]

Selon les conditions météorologiques et climatiques, le type de glace atmosphérique change. La température de l'air et la vitesse du vent influencent de façon considérable le type de glace. La figure (2.1) présente les conditions de formation de chaque type de glace.

Ces tests furent réalisés à partir de prélèvements de glace sur site montagneux à Hokkaido au Japon [Kuroiwa, D. (1958)]. Les travaux en laboratoire de Laforte, J.-L et C. Phan, (1981) confirment ceux réalisés par Kuroiwa, D (1958).

Le tableau (2.1) résume les conditions météorologiques de formation des diverses glaces atmosphériques [Kuroiwa, D. (1965), Imai, I. (1953) et Oguchi, H. et al (1953), CEI-826, (1991)].

Types de glace	Densité (g/cm ³)	Température (°C)	Vitesse du vent (m/s)	Aspect	Adhérence
Givre léger	0,4 à 0,6	-20 à -1	≤ 10	blanche	moyenne
Givre dur	0,7 à 0,9	-10 à -1	10 ≤	opaque à transparente	forte
Verglas	0,9	-4 à 0	0 à 10	transparente	forte
Neige collante	0,4 à 0,6	-1 à 2	0 à 20	blanche	moyenne

Tableau 2.1 : Paramètres météorologiques influençant la formation du givre [CEI-826, (1991)]

Les types de glace produits en laboratoire artificiellement ne diffèrent pas de ceux formés dans les sites naturels. Les conditions de formation en laboratoire s'apparentent à celles du milieu atmosphérique naturel [Laforte, J.-L. et al (1982)]. Contrairement au milieu naturel, les conditions atmosphériques comme la vitesse du vent, la température de l'air, la teneur en eau et la grosseur des gouttelettes peuvent être contrôlées dans un

laboratoire. Cet avantage permet de créer des échantillons de glace homogènes et adéquats pour les besoins d'étude.

2.1.2 Évolution et formes des dépôts de glace sur les câbles

L'évolution et la formation d'un dépôt de glace sur les câbles et conducteurs de transport d'énergie électrique se déroulent en trois phases : la phase d'accumulation, la phase de persistance et la phase de délestage [Kuroiwa, D. (1958)]. Par contre, un événement peut aussi se produire par une combinaison des trois phases déjà mentionnées. Certains de ces scénarios sont :

- accumulation, persistance et délestage
- accumulation et délestage
- accumulation, persistance, accumulation et délestage.

La phase d'accumulation se caractérise par une forte croissance de la glace en un temps moyennement court. La phase de persistance se manifeste par une croissance ou décroissance lente, qui peut persister entre quelques secondes et plusieurs jours. Quant à la phase de délestage, elle se caractérise par une décroissance du dépôt de glace [Bernardin, S. (1989)]. Selon le type d'averses et les conditions météorologiques, la forme du dépôt de glace sur les câbles et conducteurs peut varier. L'accrétion est due soit à des précipitations, soit à des nuages givrants. Ces averses sont souvent accompagnées de vent qui est un facteur très important lors de la phase de formation du dépôt de glace. En effet, un câble

peut tourner sous l'action conjointe du vent et du poids de la glace, car ces derniers exercent des forces importantes. Selon la rigidité en torsion du câble, deux formes sont souvent observées : elliptique ou circulaire. La forme circulaire est observée si la rigidité en torsion du câble est faible (diamètre petit, type des matériaux) ; alors que si la rigidité est importante (conducteurs arrangés en faisceaux avec entretoises) c'est la forme elliptique qui est constatée. La figure (2.2) montre deux accumulations : circulaire et elliptique.

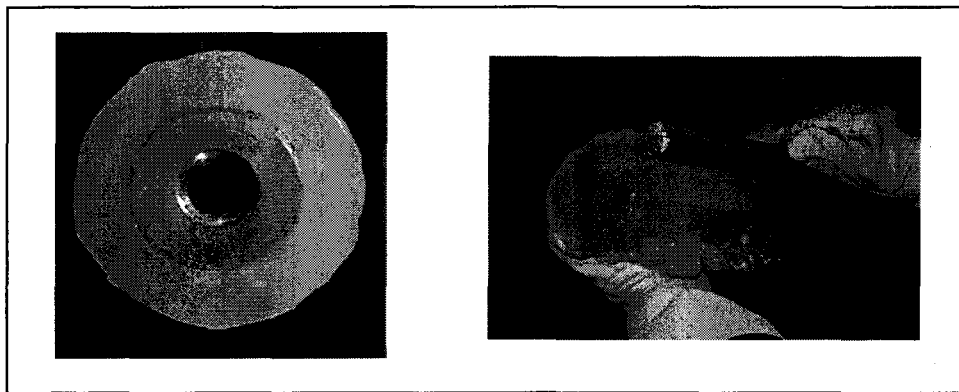


Figure 2.2 : Manchons circulaire et elliptique

Il est nécessaire parfois, d'estimer l'épaisseur radiale d'un dépôt de glace à partir de sa masse totale. Ce cas est rencontré lorsque les données proviennent d'un site naturel. Généralement, lorsqu'il y a absence de formation de glaçons, la forme d'un dépôt de glace se situe entre une géométrie circulaire et elliptique. L'épaisseur radiale dans le cas d'un dépôt circulaire est donnée par l'équation (2.1) et par l'équation (2.2) lorsque le dépôt est elliptique.

$$\varepsilon = \frac{\left(\sqrt{d_c^2 + (4m / \pi L \rho)} - d_c \right)}{2} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon = \frac{4m}{\pi L \rho d_c} \quad (2.2)$$

Dans ces équations, d_c est le diamètre du câble, m est la masse totale de glace sur le câble, L est la longueur du câble, ρ est la masse volumique de la glace et ε est l'épaisseur radiale de la glace. La figure (2.3) représente les caractéristiques géométriques des manchons circulaires et elliptiques.

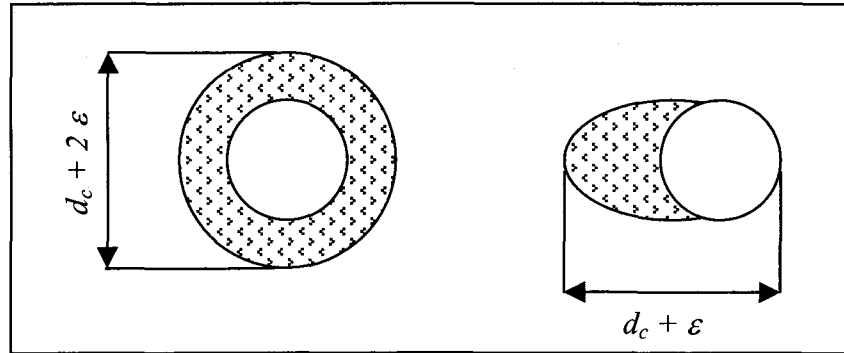


Figure 2.3 : Caractéristiques géométriques des manchons circulaires et elliptiques

2.2 PHASE D'ACCUMULATION

L'accumulation est la première étape d'un événement de givrage. Contrairement à la phase de délestage, plusieurs études furent consacrées à l'accumulation. Elles se classent

en trois catégories : études théoriques, études expérimentales en laboratoire et des études sur les sites naturels. Parmi les études théoriques on trouve : [Druez, J. et P. McComber, (1988), Ilinca, A., F. et al (1996), Lozowski, E.P. et al (1983), Lozowski, P. et J-F. Gayet (1988), Makkonen, L. (1996), McComber, P. *et al* (1983), McComber, P., J. et al (1987), Poots, G. et P.L.I. Skelton, (1992) et (1992), Poots, G., (1998), Szilder, K. et al (1988), William, R. et Jr. Schaub, (1996)]. En ce qui concerne les études en laboratoire et sur sites naturels il y a : [Lozowski, E.P., et al (1983), Pezard, J. (1993), Farzaneh, M. et J.-L. Laforte (1994), Savadjiev, K. et al (1996)].

2.3 PHASE DE DÉLESTAGE

La phase de délestage naturel comprend trois modes principaux : le délestage par sublimation, par bris mécanique et par fonte. Chacun de ces trois modes est caractérisé par différents paramètres climatiques. En effet, la température de l'air, la vitesse du vent, l'humidité, la forme du dépôt ainsi que d'autres paramètres vont influencer considérablement le type de délestage. Les délestages par fonte et par sublimation sont directement liés aux propriétés thermodynamiques de la glace, alors que le délestage par bris mécanique est entièrement déterminé par les conditions rhéologiques de la glace et par les facteurs météorologiques.

2.3.1 Délestage par sublimation

La sublimation désigne le changement d'état de la glace en vapeur d'eau. Ce changement d'état intervient à des températures négatives [Bazitoglu, Y. et P.G. Kroeger, (1990)]. Peu d'études furent consacrées à ce phénomène. La majorité des articles de littérature concernent la sublimation de la glace dans la nourriture et les produits congelés. Les travaux de Douglas, R.H. (1957) et Dyer, D.F. (1965) sont parmi les premières études réalisées sur le sujet. Dans ces travaux, un bilan de transfert de chaleur et de masse du processus de sublimation est donné. Luikov, A.V. et Lebedev, D.P. (1973) ont réalisé une étude sur le processus de sublimation de la glace et les équations fondamentales de transfert de chaleur par évaporation d'un corps solide sont données. Des résultats expérimentaux sur la sublimation de la glace avec apport de chaleur par rayonnement et conduction aussi bien que ceux sur la sublimation dans les procédés de séchage sont exposés également.

Les travaux expérimentaux dans un tunnel réfrigéré de Aguirre-Puente, J. et R.N. Sukhwal (1984) ont montré l'existence d'une relation linéaire entre la vitesse du vent et le taux de sublimation. Par contre, les tests se limitent à de faibles vitesses du vent soit : 0,5 ; 1,5 et 2,5 m/s. La linéarité entre le taux de sublimation et la vitesse du vent est probablement due à la variation linéaire du coefficient de transmission de la chaleur par convection forcée h avec la vitesse du vent. De même, ils ont montré que le taux de sublimation augmente considérablement si la température de l'air augmente. En effet, le taux de sublimation triple si la température de l'air passe de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Les résultats obtenus par Aguirre-Puente, J. et al (1985) et Lambrinos, G. et al (1987) ont permis d'obtenir une relation empirique entre le taux de sublimation, τ_s ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), la température de l'air T_{air} , la vitesse du vent V et l'humidité relative H . La méthode de séparation des variables fut utilisée pour obtenir l'expression de l'équation (2.3). Cette formule est valable si la vitesse du vent est comprise entre 0,5 et 4 m/s, la température de l'air entre -30 °C et -9 °C et l'humidité relative entre 30 et 90 %.

$$\tau_s = A + BV_{air} \quad (2.3)$$

$$A = \exp(-5,928 - 26,236H) \cdot \exp[(0,035505 + 0,090555H)T_{air}]$$

$$B = H(0,12304T_{air} - 28,83931) \cdot (8,75 - 0,038133T_{air})$$

Dans ces relations, T_{air} est exprimée en Kelvin et V_{air} en m/s. La relation empirique (2.3) décrit bien les résultats de l'expérience et la déviation n'excède pas 15 %. De même, les travaux expérimentaux faits par Lambrinos et al (1987) sur des échantillons de glace, ont montré que ce processus dépend de l'humidité, de la température de l'air et de la vitesse du vent. En effet, le taux de sublimation augmente si la température et la vitesse du vent augmentent et l'humidité est faible. Ce taux peut varier entre 3 % et 40 %, selon les conditions météorologiques et le type de dépôt de glace. Grâce à ces travaux, on constate que le phénomène de sublimation est caractérisé par un faible taux de délestage à des températures négatives.

Le travail de Bernardin, S. (1989) sur le site naturel du Mont-Valin (Québec, Canada) a montré que le taux du délestage par sublimation est une fonction croissante avec la charge totale de glace. En effet, en utilisant les données recueillies sur ce site, il a été possible de dresser le tableau (2.2) dans le cas où la charge initiale de la glace est égale à 5 kg/m.

Température (°C)	Taux de décroissance (g/m.h)
-10	40 à 45
-18	27

Tableau 2.2 : Résultats expérimentaux sur la sublimation [Bernardin, S. (1989)]

Le flux de diffusion de la vapeur est déterminé à partir de la loi de Fick et un modèle mathématique de sublimation peut être divisé en trois parties : la zone d'air, la zone de changement de phase et la zone de glace [Aguirre-Puente, J. et al (1984), Lambrinos et al (1987)]. Le départ des molécules de la surface de glace vers l'air ambiant requiert une concentration de vapeur $C_s = p_v / R_v T_{air}$. Ce terme est inclus dans l'expression du taux de sublimation :

$$\tau_s = \frac{D_{va}}{\delta Re} (C_s - C_0) \quad (2.4)$$

Où p_v est la pression partielle de la vapeur d'eau, R_v la constante des gaz parfaits, D_{va} le coefficient de diffusion vapeur-eau, δ l'épaisseur de la couche limite, Re le nombre de Reynolds et C_0 une fonction de l'humidité et la température. Finalement, une étude de la

sublimation de glace au niveau moléculaire est donnée par Chen, J.P. et P.J. Crutzen, (1994) et Nelson, J. (1998).

2.3.2 Délestage par bris mécanique

Le délestage par bris mécanique se produit à des températures négatives et se caractérise par des taux élevés. En effet, il a été observé sur des sites naturels un délestage qui atteint parfois 100 % du dépôt de glace accumulée [Bernardin, S. (1989)]. Toutefois, il n'existe pratiquement pas d'études capables d'expliquer ce phénomène. Le délestage par bris mécanique peut être causé par une faible adhésion entre la glace et le câble. Cette faiblesse est due soit à une charge statique (flexion, torsion), dynamique (déplacement, galop) ou rhéologique (type de la glace, fissure) [Druez, J. et P. McComber (1997)]. Ces causes restent toujours complexes et difficiles à étudier. La force d'adhésion de la glace a fait l'objet d'étude de la part de Laforte, J.-L, et al (1982) et Druez, J. et al (1985). Le délestage par bris mécanique dépend également des caractéristiques mécaniques de la glace comme la résistance à la compression due au vent [Michel, B. (1979), Druez, J. et al (1986) et (1987)]. Par contre, des essais en compression uniaxiale ont été réalisés par Hallam, S.D. et al (1987) dans le but d'étudier la propagation des fissures en fonction de la déformation, la position et la densité des fissures. Finalement, l'étude de Scavuzzo, R.J. et al (1994) a mis en évidence l'influence des forces aérodynamiques sur le délestage par bris mécanique.

Il existe toujours des défauts microscopiques dans la glace et ils constituent des lieux préférentiels de concentration de contraintes. Ces lieux peuvent être soit une bulle d'air ou un pore. Pour qu'une fissure existe et puisse se propager en menant à la rupture, il faut qu'elle remplisse deux critères : le critère de formation d'une fissure et le critère de propagation [Michel, B. (1979)].

Une classification statistique des facteurs influençant le délestage par bris mécanique utilisant la méthode de régression linéaire multiple, fut développée par Bernardin, S. (1989). Il s'agit d'étudier l'influence de la température et la vitesse du vent pendant la période d'accumulation ; la température pendant la période de délestage et la charge de la glace avant le délestage sur le taux du délestage. L'étude a montré que le facteur le plus important est le vent observé pendant la phase de délestage. Le deuxième facteur entrant dans le modèle de régression est la charge de la glace, le troisième facteur est la température durant la phase du délestage. La vitesse du vent et la température pendant la phase d'accumulation ont un faible coefficient de corrélation comparées aux autres facteurs, ce qui rend leur influence négligeable.

Selon les conditions météorologiques, l'accumulation de glace sur les structures peut être classifiée en deux catégories : l'accumulation sèche et l'accumulation humide. Si l'accumulation de glace est sèche, le délestage sera provoqué dans la plupart des cas par un manque d'adhésion entre le câble et la glace alors que si l'accumulation est humide le délestage se fera par la fonte entre le conducteur et la glace ou entre la glace et l'air [Druez, J. et P. McComber (1997)].

Plusieurs types d'accidents peuvent se produire lors du délestage par bris mécanique. Par exemple, le délestage soudain d'un câble [Irvine, H.M. (1981), Roshan Fekr, M. et G. McClure (1996), Roshan Fekr, M. et al (1998), Jamaledine, A. et al (1996)] peut provoquer un déplacement du conducteur d'amplitude suffisamment grande pour que ce dernier touche d'autres conducteurs, provoquant ainsi un court-circuit [Savadjiev, K. et M. Farzaneh (1996), Savadjiev, K et M. Farzaneh, (1997)]. De plus, la décharge non symétrique de la glace peut aussi causer un déséquilibre des forces aérodynamiques et par conséquent, d'importants dommages aux conducteurs, aux câbles et aux accessoires [Fuheng, S. et H. Shixiong (1988)].

2.3.3 Délestage par fonte

Dans le cas du délestage par fonte, les principales caractéristiques sont la température de l'air ambiant, qui devra être supérieure à zéro, et la vitesse du vent. Le transfert de chaleur se fait par convection et la quantité de glace délestée est relativement moyenne, car seule la partie périphérique extérieure du manchon de glace est exposée à l'air ambiant. Ce type de délestage se produit sur les câbles de garde, et les conducteurs où l'intensité du courant électrique n'est pas suffisante pour engendrer une fonte de glace sur la partie périphérique intérieure.

Il existe souvent des cas où une partie de la surface du câble n'est pas recouverte de glace. Cette surface du câble peut absorber une bonne quantité de chaleur et transmettre ce réchauffement par conduction au reste du câble. Cette augmentation de la température

provoque une diminution de la force d'adhésion entre le câble et la glace. Lorsque la force d'adhésion devient trop faible pour compenser les forces aérodynamiques (vent, gravité, galop) de gros morceaux de glace tombent. Ce phénomène se nomme délestage mécanique amorcé par la fonte [Bernardin, S. (1989)].

Pour calculer le taux de délestage par fonte à partir des variables physiques ou météorologiques, trois méthodes ont été retenues : la méthode des degrés-jours, la méthode empirique et la méthode thermique. La première méthode est basée sur le calcul de la quantité de chaleur qui correspond à l'augmentation de 1 °C par 24 heures [Upadhyay, D.S. (1995)]. La méthode empirique consiste en une régression du taux de la fonte à partir des données sur un site naturel ou en laboratoire [Upadhyay, D.S. (1995)]. Finalement, la méthode thermique est basée sur un bilan d'énergie plus détaillé [Brunt, D. (1945), Haltiner, G.J. et F.L. Martin (1957), Gold, L.W. et G.P. Williams (1960), Jakubowski, G.S. et W.S. Janna (1989), Kondo, J. et T. Yamazaki (1990), Bazitoglu, Y. et P.G. Kroeger (1990), Transmission and Distribution Committee (1993), Alexiades, V. et D.A. Solomon (1993), Upadhyay, D.S. (1995), Ryerson, C.C. et P. Kenyon (1996), Semaan, S. et X.T. Zhang (1996), Zuo, Z. et J. Oerlemans (1996), Sarraf, S. et X.T. Zhang (1996), Makkonen, L. (1997), Kahraman, R. et al (1998)]. La méthode thermique est celle utilisée dans cette étude et elle est décrite dans le chapitre 3. Cette méthode a l'avantage d'estimer qualitativement le flux de la fonte.

La surface d'un manchon de glace peut perdre de la chaleur sous l'effet d'une combinaison des flux de chaleur suivants : les radiations solaires, les radiations atmosphériques, la convection naturelle et forcée entre la glace et l'air, le flux de chaleur latente libérée par condensation ou sublimation de l'humidité sur la surface de la glace, la conduction entre le câble et la glace et la perte par radiation propre à la surface de la glace.

Les flux de chaleur échangés entre l'environnement extérieur (air, soleil, radiations, vent ...) et un manchon de glace qui entoure globalement le câble est exprimée par l'équation (2.5). Par contre, cette expression n'est pas valide en présence d'accumulation.

$$\sum q_i = q_n + q_{a-g} + q_e \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (2.5)$$

Dans cette équation, q_n représente la somme des flux de chaleur par radiations solaires et atmosphériques, q_{a-g} est la convection forcée ou naturelle entre l'air et la glace et finalement q_e est le flux d'humidité.

Il est donc possible de faire un bilan total de la chaleur nette perdue ou gagnée par un manchon de glace. Si le bilan énergétique est positif la glace se réchauffe, et lorsqu'elle atteint zéro degré elle commence à fondre. Si le bilan thermique est négatif et le manchon de glace est humide, l'eau captée gèle puis le manchon de glace se refroidit permettant ainsi des processus de sublimation ou du bris mécanique.

Zuo, Z. et J. Oerlemans (1996) ont suggéré l'utilisation de l'expression (2.6) pour le calcul quantitatif du taux de la fonte τ_f ($\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) dans un intervalle de temps compris entre t_1 et t_2 . Ainsi, f représente la fraction de glace fondue et captée à l'intérieur du manchon de glace pour regeler une seconde fois et L (J.kg^{-1}) est la chaleur latente de fusion de la glace. Pour que l'expression (2.6) reste valable, il faut s'assurer que l'énergie nette stockée (Δq) soit constante pendant l'intervalle de calcul.

$$\tau_f = \int_{t_1}^{t_2} (1-f) \min\left(0, \frac{-\Delta q}{L}\right) dt \quad (2.6)$$

2.3.3.1 Estimation de q_n

Les recherches effectuées par Brunt, D. (1945), Haltiner, G.J. et F.L. Martin (1957) et Lliboutry, L. (1964), Zuo, Z. et J. Oerlemans (1996) ont montré que les radiations solaires nettes reçues par la surface de la glace s'écrivent :

$$q_n = R_0 \tau_a \tau_n (1-\alpha) + q_a - \sigma T_g^4 \quad (2.7)$$

De cette manière, R_0 représente les radiations solaires nettes incidentes, τ_a le coefficient de diffusion propre à l'atmosphère, τ_n le coefficient de transmissivité des nuages, α l'albédo de la surface de la glace, q_a les radiations infrarouges incidentes émises par l'atmosphère,

T_g la température de la surface de la glace et σ la constante de Stephan qui vaut $5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴.

Les radiations solaires nettes incidentes, R_0 , qui arrivent sur la terre peuvent être estimées en utilisant les méthodes d'observation et des mesures météorologiques ou calculées par des lois physiques [Brunt, D. (1945)]. Ce flux de radiations solaires quotidien dépend de la latitude et de l'époque de l'année. Cette valeur doit s'ajuster à la perte de chaleur due à l'absorption, la réflexion et la diffusion de ce flux dans l'atmosphère τ_a , et à la présence de nuages τ_n . Lorsque ces radiations atteignent un morceau de glace, seule une fraction est absorbée $(1-\alpha)$.

La quantité R_0 est mesurée et publiée par Environnement Canada, Service de l'Environnement Atmosphérique [Hay, J.E. (1977), Phillips, D.W. et D. Aston (1980)]. Dans ces publications, on fournit des données pour onze stations au Québec. Les données pour les villes de Québec, Montréal, Schefferville et Sept-îles sont ainsi disponibles. Il est à noter que les valeurs R_0 sont mesurées pour une surface horizontale ; toutefois, ces valeurs peuvent être ajustées si la surface de la glace est inclinée. Certes, ces mesures ont été faites il y a 20 ans, mais elles permettent de quantifier ce flux. Par ailleurs, cette valeur peut être calculée par des lois physiques. Toutefois, l'interprétation physique et le calcul théorique restent difficiles à réaliser [Haltiner, G.J. et F.L. Martin, (1957)].

L'atténuation des radiations solaires par l'absorption et la diffusion dans l'atmosphère et par la présence de nuages est représentée par les coefficients τ_a et τ_n respectivement. L'étude réalisée par Zuo, Z. et J. Oerlemans (1996) suggère l'utilisation de l'expression (2.8) pour estimer le coefficient de diffusion propre à l'atmosphère. Alors que Konzelmann

et al (1994) ont montré que la fraction τ_n due à la présence des nuages dans l'atmosphère est donnée par l'expression (2.9) :

$$\tau_a = 0,75 + 0,000023h \quad (2.8)$$

$$\tau_n = 1 - 0,78N^2 \exp(-0,00085h) \quad (2.9)$$

Ainsi, h est l'altitude de la station par rapport au niveau de la mer, exprimée en mètres ; et N est la nébulosité (cloudiness) qui se définit comme étant la portion du ciel qui est recouverte de nuages.

La glace renvoie une fraction α des radiations solaires qu'elle reçoit, c'est ce qu'on appelle l'albédo. L'albédo définit donc le pouvoir réfléchissant d'un corps et s'exprime par le rapport entre le flux réfléchi et le flux incident, sa valeur est comprise entre 0 et 1. Il dépend fortement de la qualité de glace et de son état superficiel. Le tableau (2.3) [Lliboutry, L. (1964)] donne la valeur d'albédo pour différents types de glace et de neige.

Types de dépôt	Albédo
Neige fraîche	0,88 à 0,81
Neige vieillie	0,81 à 0,65
Glace	0,5 à 0,43
Glace avec impuretés	0,45 à 0,3

Tableau 2.3 : Valeurs sélectives d'albédo

Très peu d'études théoriques ont exprimé l'albédo en fonction des variables thermodynamiques et rhéologiques de la glace. Les valeurs fournies dans le tableau (2.3) furent mesurées par deux pyranomètres [Hand, I.F. (1946)] calibrés et placés à la même hauteur. Les pyranomètres mesurent les radiations à ondes courtes. Le premier mesure les radiations incidentes, alors que le deuxième mesure les radiations réfléchies. Le rapport entre les radiations réfléchies et les radiations incidentes donne l'albédo.

La surface de la glace reçoit des radiations infrarouges de l'atmosphère (q_a). En effet, les gaz présents dans l'atmosphère ont de nombreuses bandes d'émission dans l'infrarouge. Les plus importantes bandes sont celles du gaz carbonique qui se situent entre 12 et 18 μm . Les autres bandes sont celles de l'ozone entre 9 et 10 μm , les bandes de la vapeur d'eau situées entre 5 et 7,5 μm et d'autres bandes étalées entre 10 à 16 μm et 24 à 80 μm . Plusieurs scientifiques ont cherché à établir des formules donnant la radiation infrarouge totale renvoyée par l'atmosphère en fonction de la pression partielle de la vapeur d'eau (p_v) et de la température de l'air. La formule la plus utilisée est celle de Konzelmann et al (1994) basée sur l'étude de Brunt (1945) :

$$q_a = \sigma T_{air}^4 \left[\left(0,23 + 0,483 \left(\frac{p_v}{T_{air}} \right)^{0,125} \right) (1 - N^3) + 0,96 N^3 \right] \quad (2.10)$$

Où N est la nébulosité (cloudiness).

2.3.3.2 Estimation de q_e

Le flux de transfert d'humidité entre l'air et la glace peut être calculé à partir de la théorie de Prandtl [Lozowski, E.P. et al (1979), Zuo, Z. et J. Oerlemans (1996)]. L'expression (2.11) représente le débit massique de la vapeur d'eau :

$$E = h \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{0,63} \frac{0,622}{p C_p} (e_a - e_s) \quad (2.11)$$

Dans cette équation, h représente le coefficient de transfert de chaleur par convection, Pr et Sc représentent les nombres de Prandtl et Schmidt respectivement [Holman, J.P. (1990)], p la pression atmosphérique, C_p la chaleur latente, e_a et e_s la pression de la vapeur d'eau et la pression de vapeur d'eau saturante respectivement et E est le débit massique de la vapeur d'eau.

Le flux de la vapeur d'eau est positif pour la condensation ($e_a \leq e_s$), où $q_e = L_c E$, et il est négatif pour l'évaporation ($e_a \geq e_s$), où $q_e = L_e E$. De plus, L_c et L_e représentant la chaleur latente de condensation et d'évaporation respectivement (J/kg), la pression de vapeur d'eau saturante peut être mesurée au-dessus de l'eau ou de la glace. Dans les deux cas nous avons les relations suivantes :

$$\text{au-dessus de l'eau} \quad e_s = 610,8 \cdot \exp[19,86(1 - 273,15/T_{air})] \quad (2.12)$$

$$\text{au-dessus de la glace} \quad e_s = 610,8 \cdot \exp[22,47(1 - 273,15/T_{air})] \quad (2.13)$$

2.3.3.3 Estimation de q_{a-g}

La convection est le mode de transmission qui implique le déplacement d'un fluide contre un solide. On la trouve dans l'échange qui a lieu entre la glace et l'air. En réalité, la convection est une combinaison entre la conduction et le transfert de matière. La glace (supposée froide) reçoit par pure conduction de la chaleur de l'air adjacent, qui le transfère de couche en couche. Une relation, dont la simplicité est trompeuse, permet d'exprimer le phénomène global de la convection :

$$q_c = h (T_{air} - T_g) \quad (2.14)$$

Le coefficient de convection h varie de point en point sur la surface de la glace. Il dépend de la rugosité de la glace [Achenbach, E. (1977)], de la forme du dépôt, de l'angle θ (figure 2.4) et de la vitesse du vent. C'est donc une grandeur globale et complexe. Ainsi, h est relié à la vitesse du vent par l'intermédiaire de deux nombres sans dimension : le nombre de Nusselt local (car il dépend de l'angle θ) $Nu_\theta = \frac{hD}{k_{air}}$ et de Reynolds $Re = \frac{VD}{\nu}$.

Où D est le diamètre total (câble et glace), k_{air} et ν sont la conductivité thermique et la viscosité cinématique de l'air respectivement. Les travaux expérimentaux effectués par Giedt, W.H. (1949) sur un cylindre lisse ont permis de tracer le nombre de Nusselt local (Nu_θ) en fonction du nombre de Reynolds et de l'angle θ (figure 2.4).

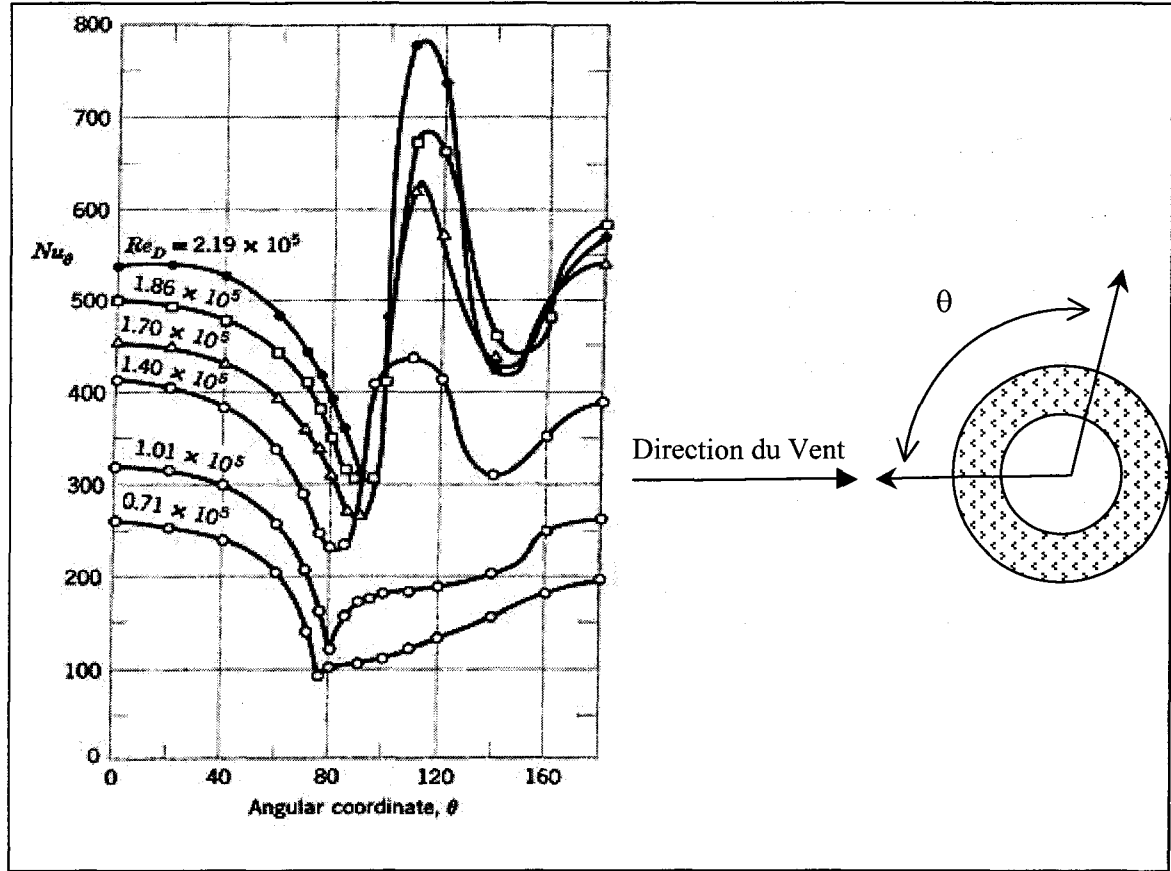


Figure 2.4 : Nu et θ en fonction de Re [Giedt, W.H. (1949)]

Dans le cas de faibles nombres de Reynolds (inférieur à 70000), l'équation (2.15) est utilisée :

$$\bar{Nu} = C Re^m Pr^{\frac{1}{3}} \quad (2.15)$$

\bar{Nu} se trouve le nombre de Nusselt moyen, C et m sont des constantes listées dans l'ouvrage d'Incropera, F. et DeWitt, D.P. (1990). La relation (2.15) permet donc de

calculer une valeur moyenne du coefficient de convection h qui sera la même autour du dépôt de glace. D'autre part, l'étude de Szilder, K. et al (1988) a permis de calculer une valeur moyenne pour le nombre de Nusselt dans le cas d'un dépôt de glace accumulé autour d'un câble de forme quelconque :

$$\overline{Nu} = 0,117 Re^{0,68} \quad (2.16)$$

Les expressions du coefficient de transfert de chaleur h discutées plus loin sont valides lorsque le transfert de chaleur se fait par convection forcée (en présence du vent). Quand, la convection est naturelle, donc en absence du vent, l'expression du coefficient h dépend d'autres variables [Holman, J.P. (1990), Kahraman, R. et al (1998)] :

$$\overline{Nu} = 0,27 Ra^{0,25} \quad (2.17)$$

$$Ra = \frac{g\beta(T_g - T_{air})D^3}{\nu\alpha}$$

Ainsi, Ra est le nombre de Rayleigh, g est la gravité, ν est la viscosité cinématique et β est le coefficient d'expansion de l'air.

2.3.3.4 Conductivité thermique de la glace

Le calcul du flux de chaleur par conduction dans le dépôt de glace nécessite la connaissance de sa conductivité thermique (k). La conductivité thermique d'un corps mesure sa capacité à conduire la chaleur, elle s'exprime en watt par mètre et par degré. Ce coefficient intervient dans le mode de transfert de chaleur provoqué par la différence de température dans le dépôt de glace. La conductivité thermique dépend de la densité de la glace, le contenu en eau, la température et la pureté de la glace.

D'après Hobbs, P.V. (1974), Dharma-wardana, M.W.C. (1983), la conductivité thermique de la glace varie entre 2 et 3 W/m.K. Cette valeur est quatre fois plus grande que la conductivité thermique de l'eau liquide à 0 °C. Les travaux réalisés par Dillard et Timmerhaus [Hobbs, P.V. (1974)] ont donné une relation empirique entre la conductivité thermique de la glace et la température de celle-ci (T_g doit être exprimée en Kelvin) . Cette relation est valable si la température de la glace varie entre 0 et -165 °C :

$$k = \frac{488,19}{T_g} + 0,4685 \quad (2.18)$$

2.3.4 Délestage forcé

Le délestage forcé désigne l'action de dégivrer un câble. On l'utilise pour délester volontairement les câbles surchargés de glace. Dans la littérature, on porte une attention toute particulière sur les méthodes de délestage forcé et ce, surtout après les catastrophes causées par le verglas pendant les hivers 1974 et 1998. Parmi les techniques proposées pour dégivrer les câbles, deux grandes catégories furent identifiées : les méthodes thermiques et les méthodes mécaniques.

Les méthodes thermiques reposent sur le principe de transfert de chaleur par effet Joule ($q_j = RI^2$). Dans ce type de méthode, la principale caractéristique est le courant électrique qui traverse le conducteur. Ainsi, la partie périphérique intérieure de la glace absorbe une quantité de chaleur et la transmet par conduction au reste du dépôt. La quantité de glace délestée est considérable, car la fonte diminue la force d'adhésion de la glace. L'action de la gravité sur la glace fait en sorte qu'il y a toujours un contact direct entre le conducteur et la partie supérieure de la glace. Une fois que l'épaisseur du dépôt de glace devient faible pour compenser la gravité, de gros morceaux de glace tombent [Clem, J.E (1930), Schuring, O.R. et C.W. Frick (1930), Lamontagne, C. et M. Bouchard (1970), McComber, P. et al (1978), Guzairov, M.B. et R.M. Rudakova (1980), Admirat, P. et al (1988), Personne, P. et J.-F. Gayet (1988), Molodtsov, B.S. et al (1989), Laforte, J.-L. et al (1994), Dmitriyev, K.S. et Ya.Ye Gonik (1997)]. Enfin, les méthodes mécaniques sont basées sur la rupture de la glace de façon manuelle ou à l'aide d'un robot [Laforte, J.-L et al (1994)].

2.4 Conclusion

D'après l'ensemble de ce chapitre, peu d'études en été faites sur le processus du délestage de la glace accumulée sur les câbles de transport d'énergie électrique. Par contre, les études antérieures ont permis d'identifier clairement les trois types de délestage soit : le délestage par bris mécanique, par sublimation et par fonte. En ce qui concerne le délestage par fonte, un bilan thermique a été décrit en détail. La surface d'un manchon de glace peut perdre de la chaleur sous l'effet d'une combinaison des flux de chaleur. Les flux de chaleur par convection naturelle (absence du vent) et par radiations solaires se trouvent nettement négligeables devant le flux de chaleur par convection forcée (en présence du vent). C'est pourquoi la présente étude est principalement consacrée à l'influence de la présence et de l'absence du vent sur la fonte de la glace.

CHAPITRE 3

MODÈLE MATHÉMATIQUE ET FORMULATION PAR ÉQUATION INTÉGRALE

Dans ce chapitre, le modèle mathématique du délestage par fonte de la glace accumulée autour des câbles de transport d'énergie électrique a été élaboré. Les équations régissant le changement de phase et le transfert de chaleur par conduction en régime transitoire dans un manchon de glace autour d'un câble cylindrique (§3.1) sont données. Le traitement numérique des équations régissant le délestage par fonte utilise la méthode des éléments finis de frontière (§3.3). Cette méthode est employée afin d'arriver à une formulation intégrale (§3.4). Ensuite, la formulation numérique (§3.5), la méthode de discrétisation de l'équation intégrale dans le temps (§3.5.1) et dans l'espace (§3.5.2), les techniques de résolution (§3.5.4) et finalement les types des conditions frontières (§3.6) sont donnés.

3.1 DÉFINITION DU PROBLÈME

Afin de modéliser le processus du délestage de la glace accumulée autour des câbles de transport d'énergie électrique, on considère que le câble est un cylindre en aluminium de surface lisse et que la glace accumulée autour de ce câble forme un dépôt cylindrique et concentrique. De même, on considère que la glace englobe totalement le câble [figure (3.1)].

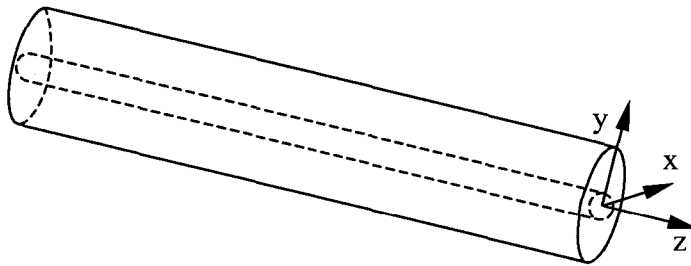


Figure 3.1 : Accumulation de glace cylindrique autour d'un câble

Le câble et la glace sont considérés comme des corps solides tridimensionnels homogènes et isotropes. Étant donné que la dimension de la longueur (z) est très grande comparée aux dimensions de la section (x,y), l'échange thermique se considère comme bidimensionnel.

Le domaine d'étude câble-glace est un domaine fermé de $[R^2]$, muni d'un repère orthonormé (x,y) et les variables du système s'expriment en coordonnées cartésiennes. La figure (3.2) représente le domaine glace-câble.

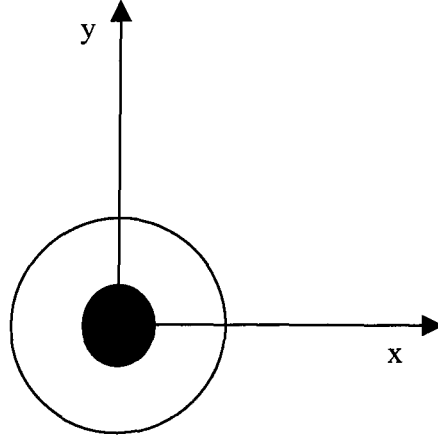


Figure 3.2 : Domaine d'étude câble-glace

L'équation différentielle gouvernant le transfert de chaleur, dans le dépôt de glace, par conduction en régime transitoire est exprimée par l'équation (3.1). Le câble est considéré comme une capacité thermique concentrée dont la température est calculée par l'équation (3.45). Les limites et les conditions d'utilisation de cette équation sont discuté au paragraphe (§3.6.1).

$$\nabla \cdot k \nabla T(\vec{r}, t) = \rho C_p \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} ; t > 0, \vec{r} \in \Omega(t) \text{ et } \vec{r} = (x, y) \quad (3.1)$$

avec la condition initiale suivante :

$$T(\vec{r}, t = 0) = T_i(\vec{r}) ; \vec{r} \in \Omega(t = 0) \quad (3.2)$$

et la condition frontière appliquée à la surface de la glace :

$$\left(k \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial n} + q(\vec{r}, t) \right) \vec{n} = \rho L \frac{d\vec{S}(\vec{r})}{dt} ; t > 0, \vec{r} \in \Gamma(t) \quad (3.3)$$

Dans ces équations ρ , k , et C_p représentent respectivement, la masse volumique, la conductivité thermique et la chaleur massique de la glace ou du câble. L désigne la chaleur latente de fusion de la glace. De plus $\frac{\partial}{\partial t}$ est une dérivée partielle par rapport au temps et ∇ définit la première dérivation partielle le long des axes x et y .

Le terme $\frac{d\vec{S}(\vec{r})}{dt}$ représente la vitesse de fonte de la frontière extérieure de la glace, au contact avec l'air. Ce terme est égal à zéro lorsque aucun changement de phase ne se produit. Cela signifie que lorsque la température de fusion T_f est atteinte à un des points de la frontière $\Gamma(\vec{r})$, la vitesse de fonte devient différente de zéro et doit être calculée à partir de l'équation (3.3).

Ainsi \vec{n} constitue un vecteur unitaire dirigé vers l'extérieur du domaine d'étude. La direction positive est choisie par convention et suivant ce vecteur. Par conséquent, le flux de chaleur q se trouve négatif. En effet, pour les problèmes de changement de phase le flux de chaleur est dirigé vers l'intérieur du domaine d'étude. Finalement, $\Omega(t)$ représente le domaine d'étude à l'instant t , et $\Gamma(t)$ constitue sa frontière extérieure (air-glace).

3.2 CHOIX DE LA MÉTHODE DE RÉOLUTION

Pour résoudre le système d'équations (3.1) à (3.3), deux approches existent : les méthodes analytiques et les méthodes numériques. Les méthodes analytiques sont de façon générale, restreintes à des géométries et à des conditions aux limites relativement simples

mais servent de comparaison et de validation. Le mécanisme du délestage pose des difficultés mathématiques assez importantes limitant ainsi l'usage de solutions analytiques. Par contre, les méthodes numériques ne bénéficient pas toutes des avantages des méthodes analytiques, c'est-à-dire exprimer directement le taux de fonte de la glace en fonction des variables thermodynamiques. Toutefois, elles permettent de résoudre de façon approximative, mais le plus souvent avec un degré de précision raisonnable, de nombreux problèmes physiques comme le changement de phase. L'étude du processus de délestage exige une revue des techniques numériques qui seront les mieux adaptées au modèle mathématique. Parmi ces méthodes numériques, il y a la méthode des différences finies [Jaluria, Y. et K.E. Torrance, (1986)], la méthode des éléments finis [Lenneth, R. et al (1979) ; Dhatt, G. et G. Touzot, (1981) ; Zienkiewicz, O.C. et R.L. Taylor, (1991)] et la méthode des éléments finis de frontière.

Toutes ces trois méthodes permettent de calculer le champ de température ainsi que son gradient dans le domaine fermé $[R^2]$. Par contre, seule la méthode des éléments finis de frontière a l'avantage de s'adapter aux problèmes de changement de phase. D'ailleurs, plusieurs études [Banerjee, P.K. et R.P. Shaw (1982) ; Elliott, C.M. et Ockendon, J.R., (1982) ; O'Neill, K. (1983) ; Hu, H. et Argyropoulos, S.A. (1996)] suggèrent l'utilisation de cette méthode lorsqu'on s'intéresse à des processus physiques au niveau de la frontière d'un domaine fermé comme : la température et son gradient, le transfert de masse, etc. Étant donné que le délestage de la glace par fonte ou par sublimation est fondamentalement un problème de changement d'état (passage de la glace à l'eau dans le cas de la fonte et de la glace à la vapeur d'eau dans le cas de la sublimation), la méthode des éléments finis de

frontière a été choisie. De plus, cette méthode de calcul offre la simplicité et la facilité de calcul de la vitesse d'ablation.

3.3 MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS DE FRONTIÈRE

La méthode des éléments finis de frontière [Brebbia, C.A. (1978) ; Brebbia C.A, et Telles J.C.F. (1984) ; Wrobel, L.C. et Brebbia, C.A.(1979) ; Beskos, D. (1983)] est basée sur la combinaison des équations intégrales classiques et des concepts d'éléments finis. Cette méthode connaît un développement rapide et significatif dans la plupart des applications aux différents domaines des sciences appliquées comme le transfert de chaleur. La méthode des éléments finis de frontière constitue essentiellement une méthode d'approximation de fonctions connues sur la frontière d'un domaine continu, par un ensemble de sous-domaines compatibles entre eux. Elle est utilisée pour transformer les équations aux dérivées partielles en système d'équations algébriques. L'application de cette méthode nécessite une reformulation des équations différentielles. En effet, il faut arriver à une formulation dite intégrale, basée sur le principe de calcul variationnel, afin de remplacer les variables inconnues par des fonctions d'approximation sur la frontière du domaine.

Dans cette méthode, les nœuds se définissent seulement sur les surfaces externes et les nœuds inconnus se trouvant à l'intérieur du domaine ne sont pas requis pour résoudre le problème. La satisfaction des conditions frontières produit un système d'équations linéaires servant à déterminer les inconnues qui sont sur la frontière. Une fois que toutes

les variables sur la frontière sont connues, il est possible de calculer n'importe quelle variable interne ou externe, puisqu'elles sont fonction des valeurs aux frontières.

D'après Wrobel, L.C. et C.A. Brebbia (1981), les principaux avantages de cette méthode sont :

- La réduction du nombre d'inconnues gouvernant le problème,
- la simplicité de manipuler l'entrée des données,
- les équations gouvernantes sont totalement indépendantes de la forme du système, ainsi elles s'appliquent à n'importe quelle géométrie,
- le nombre de dimensions du problème est diminué de un,
- seul le maillage de la frontière est requis et non pas tout le domaine du calcul,
- la réduction du nombre d'éléments de maillage entraîne une diminution significative du temps de calcul,
- le remaillage du domaine d'étude est facile dans le cas du changement de phase.

Grâce à l'introduction de la fonction de Green (paragraphe : §3.4), la résolution de l'équation de conduction (3.1) avec la condition frontière (3.3) par la méthode des éléments finis de frontière nécessite l'utilisation d'une diffusivité thermique ($\alpha = k / (C_p \rho)$) constante [Morse, P.M. et H. Feshbach (1953)].

Il existe deux possibilités : la première est de considérer la conductivité thermique et le produit de la chaleur spécifique avec la masse volumique comme étant constants, la deuxième alternative est de considérer (si cela est possible) une variation de ces paramètres

en fonction de la température, de telle sorte que le rapport entre la conductivité thermique et le produit de la chaleur spécifique avec la masse volumique soit constant.

Compte tenu de la faible variation de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique et de la masse volumique de la glace avec la température [Hobbs, P.V. (1974)], la première alternative fut choisie, soit celle de considérer constantes les propriétés thermiques de la glace et du câble. En procédant ainsi, l'équation de conduction (3.1) s'écrit :

$$\nabla^2 T(\vec{r}, t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad t > 0; \quad \vec{r} \in \Omega(t) \quad (3.4)$$

3.4 FORMULATION INTÉGRALE

Tout comme dans la méthode des éléments finis, il existe trois catégories pour les formulations par équations intégrales : la formulation par équations intégrales directes, la formulation par équations intégrales semi-directes et la formulation par équations intégrales indirectes. C'est la formulation par équations intégrales directes qui est suggérée par Brebbia, C.A. (1978) pour le cas du transfert de chaleur en régime transitoire (équation 3.1). Dans cette approche, les inconnues apparaissant dans les équations sont les variables physiques du problème (température et diffusivité thermique).

Pour obtenir la formulation par équation intégrale de l'équation (3.1), la formule généralisée de Green, le principe des résidus pondérés et l'intégration par partie ont été

utilisés [Chuang, Y.K. et J. Szekely (1971) ; Beck, J.V. (1984) ; Hong, S. et K, Schwerdtfeger (1998)].

L'équation de Green appropriée est :

$$G^*(\vec{r}, t / \vec{r}_o, \tau) = \frac{1}{4\pi\alpha(t-\tau)} \exp\left(\frac{-|\vec{r} - \vec{r}_o|^2}{4\alpha(t-\tau)}\right) u(t-\tau) \quad (3.5)$$

Le terme $u(t-\tau)$ désigne la fonction échelon-unité, les vecteurs \vec{r} et \vec{r}_o représentent respectivement le vecteur position du point (x,y) et le vecteur observateur du point (x_o, y_o) .

G^* est une solution de l'équation différentielle (3.6) pour un domaine infini. Cette solution est possible si l'on considère t et le vecteur \vec{r} constants et si l'on fait varier τ et \vec{r}_o .

$$\nabla^2 G^* + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial G^*}{\partial t} = 0 \quad ; \quad \tau < t \quad (3.6)$$

Pour trouver l'équation intégrale équivalente à (3.4), on procède ainsi :

$$\frac{\partial(G^* T(\vec{r}_o, \tau))}{\partial \tau} = G^* \frac{\partial T(\vec{r}_o, \tau)}{\partial \tau} + T(\vec{r}_o, \tau) \frac{\partial G^*}{\partial \tau} \quad ; \quad \tau < t \quad (3.7)$$

En utilisant les équations (3.4) et (3.6), l'équation (3.7) devient :

$$\frac{\partial(G^* T(\vec{r}_o, \tau))}{\partial \tau} = \alpha (G^* \nabla^2 T(\vec{r}_o, \tau) - T(\vec{r}_o, \tau) \nabla^2 G^*) \quad (3.8)$$

Par contre, si l'on intègre l'équation (3.8) sur le domaine $\Omega(\tau)$ et par la suite sur l'intervalle de temps $[0, t - \varepsilon]$ (ε est une quantité infinitésimale de temps), on obtient :

$$\int_0^{t-\varepsilon} \int_{\Omega(\tau)} \frac{\partial(G^*T(\vec{r}_o, \tau))}{\partial \tau} d\Omega_0 d\tau = \alpha \int_0^{t-\varepsilon} \int_{\Omega(\tau)} (G^* \nabla^2 T(\vec{r}_o, \tau) - T(\vec{r}_o, \tau) \nabla^2 G^*) d\Omega_0 d\tau \quad (3.9)$$

En utilisant la seconde identité de Green pour le terme de droite de l'équation (3.9), celle-ci devient :

$$\int_0^{t-\varepsilon} \int_{\Omega(\tau)} \frac{\partial(G^*T(\vec{r}_o, \tau))}{\partial \tau} d\Omega_0 d\tau = \alpha \int_0^{t-\varepsilon} \int_{\Gamma(\tau)} \left(G^* \frac{\partial T(\vec{r}_o, \tau)}{\partial n} - T(\vec{r}_o, \tau) \frac{\partial G^*}{\partial n} \right) d\Gamma_0 d\tau \quad (3.10)$$

Ainsi, $\frac{\partial}{\partial n}$ désigne la dérivation selon la direction du vecteur normal \vec{n} de la frontière $\Gamma(\tau)$ de la surface du domaine $\Omega(\tau)$.

Pour pouvoir continuer le traitement mathématique, le terme de gauche de l'équation (3.10) doit être intégré. Ce terme mérite une attention toute particulière. En effet, il n'est pas possible d'inverser l'ordre d'intégration, c'est-à-dire intégrer par rapport à l'espace et ensuite par rapport au temps. Cela vient du fait que la frontière subit une déformation dans le temps. Cependant, il existe une façon de réécrire ce terme en utilisant le théorème de transport de Reynolds généralisé [O'Neill, K. (1983)] :

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \int_{\Omega(\tau)} h d\Omega_o = \int_{\Omega(\tau)} \frac{\partial h}{\partial \tau} d\Omega_o + \int_{\Gamma(\tau)} h \frac{dS(\vec{r}_o)}{dt} d\Omega_o \quad (3.11)$$

Où $\frac{d\vec{S}(\vec{r}_o)}{dt}$ désigne le vecteur vitesse de déplacement de la frontière $\Gamma(\tau)$ suivant le vecteur

unité \vec{n} et h est une fonction intégrable et différentiable sur le domaine $\Omega(\tau)$.

En remplaçant h par $G^*T(\vec{r}_o, \tau)$ dans l'équation (3.11), le terme de gauche de l'équation

(3.10) devient :

$$\begin{aligned} \int_0^{t-\varepsilon} \int_{\Omega(\tau)} \frac{\partial(G^*T(\vec{r}_o, \tau))}{\partial \tau} d\Omega_o d\tau = & - \int_0^{t-\varepsilon} \int_{\Gamma(\tau)} G^*T(\vec{r}_o, \tau) \frac{dS(\vec{r}_o)}{dt} d\Gamma_o d\tau + \int_{\Omega(\tau-\varepsilon)} G^*T(\vec{r}_o, t-\varepsilon) d\Omega_o \\ & - \int_{\Omega(0)} G^*T(\vec{r}_o, 0) d\Omega_o \end{aligned} \quad (3.12)$$

Pour éviter la singularité qui apparaît dans la fonction de Green lorsque $\vec{r}_o \rightarrow \vec{r}$ et $\tau \rightarrow t$, l'intégrale sur le temps sera évaluée entre 0 et $(t-\varepsilon)$. Toutefois, en suivant le développement mathématique de Brebbia [Brebbia, C.A. et J.C.F. Telles (1984)] et en considérant la limite lorsque $\varepsilon \rightarrow 0$, l'équation (3.12) devient :

$$\begin{aligned} \varphi(\vec{r})T(\vec{r}, t) = & \alpha \int_0^t \int_{\Gamma(\tau)} \left(G^* \frac{\partial T(\vec{r}_o, \tau)}{\partial n} - T(\vec{r}_o, \tau) \frac{\partial G^*}{\partial n} \right) d\Gamma_o d\tau + \int_0^t \int_{\Gamma(\tau)} \left(G^*T(\vec{r}_o, \tau) \frac{dS(\vec{r}_o)}{dt} \right) d\Gamma_o d\tau \\ & - \int_{\Omega(0)} G^*T(\vec{r}_o, 0) d\Omega_o \end{aligned} \quad (3.13)$$

Dans l'équation (3.13), le terme $\varphi(\vec{r})$ est un facteur de forme proportionnel à l'angle solide où l'observateur se situe. Sa valeur en deux dimensions est connue :

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{\theta}{2\pi} \quad (3.14)$$

Si l'intervalle d'intégration est à l'extérieur du domaine d'étude $\Omega(\tau)$, $\theta = 0$. Par contre, s'il est sur la frontière $\Gamma(\tau)$, θ devient l'angle que fait les tangentes de part et d'autre du point d'observation. Cet angle se mesure en radian dans le sens anti-horaire à condition que le solide soit un système fermé (figure 3.3). Finalement, si l'intervalle d'observation se trouve à l'intérieur du domaine, le facteur de forme est égal à 1.

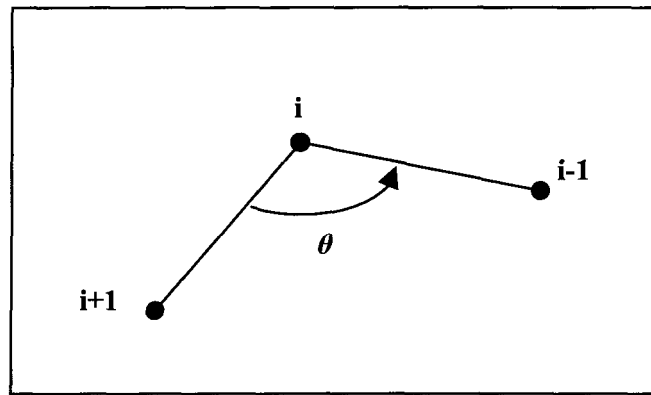


Figure 3.3 : Définition de l'angle θ pour le nœud i

Puisque la température de fusion T_f de la glace est égale à 0 °C, elle sera prise comme température de référence. Si la température de la frontière de la glace est inférieure à sa

température de fusion, la vitesse de déplacement $\frac{d\vec{S}}{dt}$ est égale à zéro. Par contre, cette vitesse devient différente de zéro une fois que la frontière de la glace commence à fondre (équation 3.15).

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{S}}{dt} &= 0 \quad \text{si } T < T_f \\ \frac{d\vec{S}}{dt} &\neq 0 \quad \text{si } T = T_f\end{aligned}\tag{3.15}$$

En se référant à ce qui est mentionné plus haut, le deuxième terme à droite de l'équation (3.13) est toujours égal à zéro. L'équation (3.13) se réécrit de la façon suivante :

$$\phi(\vec{r})T(\vec{r},t) = \alpha \int_0^t \int_{\Gamma(\tau)} \left(G^* \frac{\partial T(\vec{r}_o, \tau)}{\partial n} - T(\vec{r}_o, \tau) \frac{\partial G^*}{\partial n} \right) d\Gamma_o d\tau + \int_{\Omega(0)} G^* T(\vec{r}_o, 0) d\Omega_o \tag{3.16}$$

À partir de l'équation (3.16), des conditions frontières et de la condition initiale, l'équation de Fourier (3.1) peut être résolue. Cependant pour y arriver, il faut discrétiser l'équation (3.16) dans le temps et dans l'espace à l'aide de techniques d'analyse numérique.

3.5 FORMULATION NUMÉRIQUE

3.5.1 Discrétisation de l'équation intégrale dans le temps

Pour trouver une solution à l'équation (3.16), la technique du pas de temps est utilisée. D'après Brebbia et Telles (1984), il existe deux méthodes de progression dans le temps. La première méthode traite chaque pas de temps comme un nouveau problème. De cette façon, il faut à la fin de chaque pas de temps calculer la distribution de la température dans le dépôt de glace, pour pouvoir l'utiliser dans le pas de temps suivant. Par contre, avec la deuxième méthode le processus d'intégration dans le temps recommence toujours à $t=0$. L'utilisation du deuxième schéma entraîne une augmentation significative du nombre d'intégrales au fur et à mesure que le temps progresse, ce qui entraîne des problèmes de convergence.

Un des avantages du premier schéma est la stabilité lors du calcul numérique [Brebbia C.A. et J.C.F Telles (1984)] ; c'est pour cette raison qu'il fut choisi lors de la présente étude. L'équation (3.16) devient alors :

$$\varphi(\vec{r})T(\vec{r}, t_s) = \alpha \int_{t_{s-1}}^{t_s} \int_{\Gamma(\tau)} \left(G^* \frac{\partial T(\vec{r}_o, \tau)}{\partial n} - T(\vec{r}_o, \tau) \frac{\partial G^*}{\partial n} \right) d\Gamma_0 d\tau + \int_{\Omega(t_{s-1})} G^* T(\vec{r}_o, t_{s-1}) d\Omega_o \quad (3.17)$$

Dans cette équation l'indice s varie entre 1 et f . Le terme t_f désigne le temps final de la simulation. De plus, si on considère que les termes $T(\vec{r}_o, \tau)$ et $\frac{\partial T(\vec{r}_o, \tau)}{\partial n}$ ne varient pas dans l'intervalle de temps $[t_{s-1}, t_s]$, l'équation (3.17) devient :

$$\begin{aligned} \varphi(\vec{r})T(\vec{r}, t) = & \alpha \int_{\Gamma(t_s)} \left(\frac{\partial T(\vec{r}_o, t_s)}{\partial n} \int_{t_{s-1}}^{t_s} G^* d\tau \right) d\Gamma_o - \alpha \int_{\Gamma(t_s)} \left(T(\vec{r}_o, t_s) \int_{t_{s-1}}^{t_s} \frac{\partial G^*}{\partial n} d\tau \right) d\Gamma_o \\ & + \int_{\Omega(t_{s-1})} G^* T(\vec{r}_o, t_{s-1}) d\Omega_o \end{aligned} \quad (3.18)$$

Dans l'équation (3.18), deux termes peuvent être intégrés analytiquement $\int_{t_{s-1}}^{t_s} G^* d\tau$ et

$$\int_{t_{s-1}}^{t_s} \frac{\partial G^*}{\partial n} d\tau.$$

3.5.2 Discrétisation de l'équation intégrale dans l'espace

La frontière $\Gamma(\tau)$ a été discrétisée à l'aide de N segments de droite que l'on nomme éléments linéaires (figure 3.4). Les fonctions d'interpolation sont :

$$\Phi_1 = \frac{1-\zeta}{2} \quad \Phi_2 = \frac{1+\zeta}{2} \quad -1 < \zeta < 1 \quad (3.19)$$

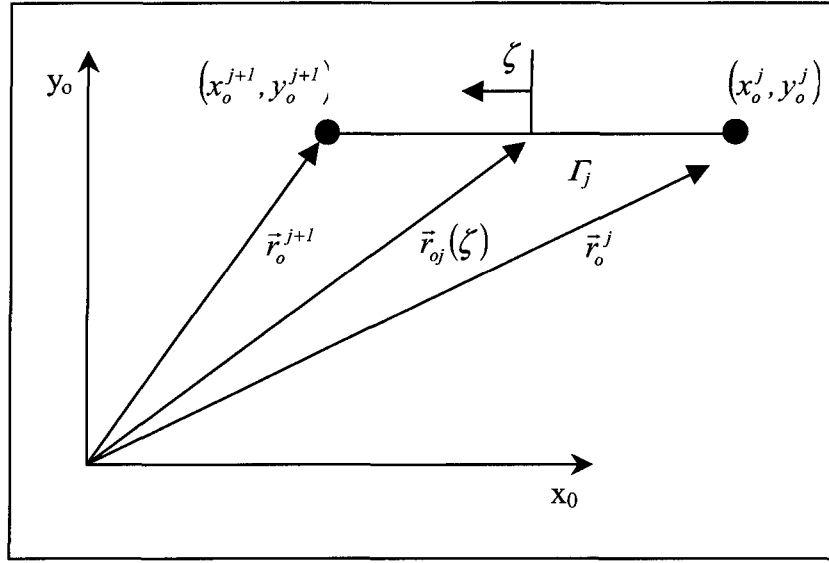


Figure 3.4 : Définition d'un élément linéaire avec numérotation des nœuds dans le sens anti-horaire.

La distribution de la température et de son gradient sur un élément de frontière Γ_j est donnée par les deux expressions suivantes :

$$T(\vec{r}_{oj}(\zeta), t_s) = [\psi_1, \psi_2] \begin{bmatrix} T(\vec{r}_o^j, t_s) \\ T(\vec{r}_o^{j+1}, t_s) \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial T(\vec{r}_{oj}(\zeta), t_s)}{\partial n} = [\psi_1, \psi_2] \begin{bmatrix} \frac{\partial T(\vec{r}_o^j, t_s)}{\partial n} \\ \frac{\partial T(\vec{r}_o^{j+1}, t_s)}{\partial n} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Les termes \vec{r}_o^j et \vec{r}_o^{j+1} désignent respectivement les vecteurs positions des nœuds (j) et ($j+1$) situés sur la frontière du domaine de calcul. Par contre, $\vec{r}_{oj}(\zeta)$ représente l'ensemble

des vecteurs positions de l'élément de frontière Γ_j . (figure 3.4). Le vecteur $\vec{r}_{oj}(\zeta)$ se définit de la façon suivante :

$$\vec{r}_{oj}(\zeta) = [\psi_1, \psi_2] \begin{bmatrix} \vec{r}_o^j \\ \vec{r}_o^{j+1} \end{bmatrix} \quad -1 < \zeta < 1 \quad (3.22)$$

$$\vec{r}_o^{N+1} = \vec{r}_o^1 \quad (3.23)$$

Après l'introduction des fonctions d'interpolations et un arrangement de l'équation (3.18), l'équation (3.24) est obtenue :

$$\begin{aligned} \varphi(\vec{r}, t_s) T(\vec{r}, t) = & \alpha \sum_{j=1}^N \left((g_j^1(\vec{r}, t_s) + g_{j-1}^2(\vec{r}, t_s)) \frac{\partial T(\vec{r}_o^j, t_s)}{\partial n} \right) - \alpha \sum_{j=1}^N \left((h_j^1(\vec{r}, t_s) + h_{j-1}^2(\vec{r}, t_s)) T(\vec{r}_o^j, t_s) \right) \\ & + \int_{\Omega(t_{s-1})} G^* T(\vec{r}_o, t_{s-1}) d\Omega_o \end{aligned} \quad (3.24)$$

Avec :

$$g_j^m(\vec{r}, t_s) = \int_{\Gamma_j(t_s)} \left(\Phi_m \int_{t_{s-1}}^{t_s} G^* d\tau \right) d\Gamma_o \quad (3.25)$$

$$h_j^m(\vec{r}, t_s) = \int_{\Gamma_j(t_s)} \left(\Phi_m \int_{t_{s-1}}^{t_s} \frac{\partial G^*}{\partial n} d\tau \right) d\Gamma_o \quad (3.26)$$

Afin d'évaluer l'intégrale sur le domaine $\Omega(t_{s-1})$, celui-ci a été discrétisé en M éléments triangulaires linéaires (figure 3.5).

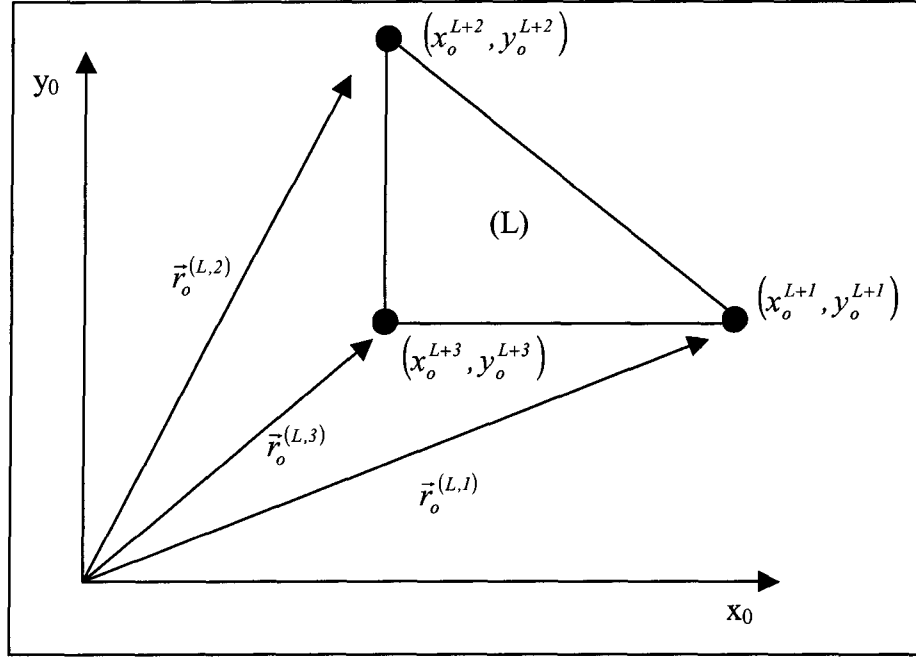


Figure 3.5 : Définition d'un élément triangulaire linéaire

Si l'on suppose que la température de chaque élément triangulaire est uniforme, on obtient :

$$\int_{\Omega_L(t_{s-1})} G^* T(\vec{r}_o^L, t_{s-1}) d\Omega_o = T(\vec{r}_o^L, t_{s-1}) \int_{\Omega_L(t_{s-1})} G^* d\Omega_o \quad (3.27)$$

De cette manière, \vec{r}_o^L représente le vecteur position du centre de gravité du $L^{ème}$ triangle. En tenant compte de l'équation (3.27), l'équation (3.24) s'écrit de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \varphi(\vec{r}, t_s) T(\vec{r}, t) = & \alpha \sum_{j=1}^N \left((g_j^1(\vec{r}, t_s) + g_{j-1}^2(\vec{r}, t_s)) \frac{\partial T(\vec{r}_o^j, t_s)}{\partial n} \right) - \alpha \sum_{j=1}^N \left((h_j^1(\vec{r}, t_s) + h_{j-1}^2(\vec{r}, t_s)) T(\vec{r}_o^j, t_s) \right) \\ & + \sum_{L=1}^M T(\vec{r}_o^L, t_{s-1}) b_L(\vec{r}, t_{s-1}) \end{aligned} \quad (3.28)$$

avec :

$$b_L(\vec{r}, t_{s-1}) = \int_{\Omega_L(t_{s-1})} G^* d\Omega_o \quad (3.29)$$

3.5.3 Évaluation des intégrales

À la section [§3.5.1], il a été mentionné que les intégrales de l'équation (3.19) peuvent être évaluées analytiquement. Ainsi, en posant :

$$u = \frac{R^2}{4\alpha(t_s - \tau)}, \quad \text{où } R = \|\vec{R}\| = \|\vec{r}_o - \vec{r}\| \quad (3.30)$$

on obtient :

$$\int_{t_{s-1}}^{t_s} G^* d\tau = \int_{t_{s-1}}^{t_s} \frac{1}{4\pi \alpha(t_s - \tau)} \exp\left(\frac{-R^2}{4\alpha(t_s - \tau)}\right) d\tau = \frac{1}{4\pi \alpha} E_1(a) \quad (3.31)$$

$$a = \frac{R^2}{4\alpha(t_s - t_{s-1})} \quad \text{et} \quad E(a) = -\gamma - \ln(a) - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-a)^k}{k.k!} \quad (3.32)$$

où γ représente la constante d'Euler qui vaut 0.577 et $E(a)$ se trouve une expression numérique convergente [Abramowitz, M. et Stegun, I.A., (1965)]. Par suite, la deuxième intégrale dans l'équation (3.19) peut être évaluée comme suit :

$$\int_{t_{s-1}}^{t_s} \frac{\partial G^*}{\partial n} d\tau = \frac{-1}{2\pi \alpha R} \frac{\partial R}{\partial n} \exp(-a) \quad (3.33)$$

L'évaluation des intégrales de frontière et du domaine présente une divergence lorsque le terme R est nul. Ces intégrales ont fait l'objet d'une attention toute particulière de la part de Ouellet, R. (1987) qui a proposé une méthode permettant de contourner le problème des singularités des termes $g_j^m(\vec{r}, t_s)$, $h_j^m(\vec{r}, t_s)$ et $b_L(\vec{r}, t_{s-1})$.

3.5.4 Technique de résolution

À partir du traitement mathématique précédent, il est possible de calculer : soit la température, soit le flux de chaleur pour chaque nœud sur la frontière et par la suite en déduire ceux à l'intérieur du domaine. Pour cela, on doit réécrire l'équation (3.28) pour chaque nœud sur la frontière et obtenir ainsi un système d'équations linéaires d'ordre N . Ce système peut s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$[H]\{T_s\} = [G]\{Q_s\} + [B]\{T_{s-1}\} \quad s = 1, 2, \dots, f \quad (3.34)$$

Les composantes de ces matrices sont données par :

$$H_{i,j} = \alpha \left(h_j^1(\vec{r}^i, t_s) + h_{j-1}^2(\vec{r}^i, t_s) \right) + \varphi(\vec{r}^i) \delta_{i,j} \quad (3.35)$$

$$G_{i,j} = \alpha \left(g_j^1(\vec{r}^i, t_s) + g_{j-1}^2(\vec{r}^i, t_s) \right) \quad (3.36)$$

$$B_{i,L} = b_L(\vec{r}^i, t_{s-1}) \quad \text{avec } i, j = 1, 2, \dots, N \quad \text{et } L = 1, 2, \dots, M \quad (3.37)$$

$$\delta_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j \\ 1 & \text{si } i = j \end{cases} \quad (3.38)$$

\vec{r}^i représente le vecteur position du nœud (i) et $\delta_{i,j}$ est l'indice de Kronecker. Les matrices colonnes transposées sont données par :

$$\{T_s\} = [T(\vec{r}_o^1, t_s), T(\vec{r}_o^2, t_s), \dots, T(\vec{r}_o^N, t_s)] \quad (3.39)$$

$$\{Q_s\} = \left[\frac{\partial T(\vec{r}_o^1, t_s)}{\partial n}, \frac{\partial T(\vec{r}_o^2, t_s)}{\partial n}, \dots, \frac{\partial T(\vec{r}_o^N, t_s)}{\partial n} \right] \quad (3.40)$$

$$\{T_{s-1}\} = [T(\vec{r}_o^{(1)}, t_{s-1}), T(\vec{r}_o^{(2)}, t_{s-1}), \dots, T(\vec{r}_o^{(M)}, t_{s-1})] \quad (3.41)$$

Pour solutionner le système d'équations linéaires (3.34) on regroupe les inconnues à gauche et les termes sources à droite après l'introduction des conditions aux limites. Une fois le système réarrangé, l'équation (3.42) est obtenue :

$$[A]\{X_s\}=[F] \quad (3.42)$$

La matrice finale $[A]$ est une matrice non-symétrique et pleine. En effet, chaque nœud situé sur la frontière influence tous les autres nœuds. La méthode d'élimination de Gauss est utilisée pour résoudre ce système d'équations. Pour le premier pas de temps ($s=1$), les termes de la matrice $\{T_{s-1}\}$ sont connus. Ces températures correspondent à la condition initiale (équation 3.2). En effet, on suppose que la distribution des températures est connue à la première itération à l'intérieur du dépôt de glace et du câble. Après une itération, les températures de la frontière sont calculées et par la suite on peut déduire celles du domaine. Cette nouvelle distribution de température à l'intérieur du domaine sert à son tour dans la deuxième itération et ainsi de suite.

Afin de calculer le taux de fonte de la glace, deux étapes de calcul sont nécessaires : l'étape de la phase de la pré-fusion et l'étape de la phase de la fusion. La pré-fusion est la phase où il y a seulement du transfert de chaleur par pure conduction. Pendant cette phase, la température de la glace monte d'une valeur négative à 0 °C et le dépôt de glace ne fondra pas. Dans ce cas, les éléments des matrices $[H]$, $[G]$ et $[B]$ sont calculés une seule fois et resteront inchangés pendant toute la durée de la phase de pré-fusion. En effet, ces matrices dépendent de la frontière du dépôt de glace et de sa diffusivité thermique.

La deuxième étape est la fusion. Durant cette étape, on considère le changement de phase de la glace de l'état solide à l'état liquide. Dans ce cas, les matrices $[H]$, $[G]$ et $[B]$ doivent être calculées à chaque pas de temps puisque la frontière du domaine change.

3.5.5 Calcul de la vitesse de fonte

Lors de la phase de fusion, il faudra calculer le déplacement de la frontière. Premièrement, on suppose que pendant le pas de temps suivant celui où la température de fusion a été atteinte autour du nœud (i) de la frontière, il n'y a pas de déplacement de ce nœud. Ensuite, pour trouver la nouvelle position de ce nœud à l'itération suivante, il faut commencer par calculer le gradient de température $\frac{\partial T(\vec{r}_o^i, t_s)}{\partial n}$ selon l'équation (3.34). Une fois le gradient de température calculé, il doit être introduit dans la condition frontière (équation 3.3) en termes nodaux [O'Neill, K. (1983)].

$$\Delta \bar{S}(\vec{r}_o^i) = \frac{(t_{s+1} - t_s)}{L\rho} \left(k \frac{\partial T(\vec{r}_o^i, t_s)}{\partial n} + q(\vec{r}_o^i, t_s) \right) \vec{m}_i \quad (3.43)$$

$$\vec{m}_i = \frac{(\vec{n}_i l_i + \vec{n}_{i-1} l_{i-1})}{\|\vec{n}_i l_i + \vec{n}_{i-1} l_{i-1}\|} \quad (3.44)$$

l_i et l_{i-1} représentent respectivement les longueurs des éléments Γ_i et Γ_{i-1} . Finalement, le nœud (i) doit être déplacé dans la direction du vecteur \vec{m}_i d'une quantité égale à $\|\Delta \bar{S}(\vec{r}_o^i)\|$.

Dans l'équation (3.26) apparaît le terme $q(\vec{r}_o^i, t_s)$. Ce terme désigne la totalité des flux de chaleur absorbés par la glace. Ces flux de chaleur peuvent être de sources générales (radiations solaires, radiations infrarouges, convection forcée ou naturelle, effet Joule ou sublimation). Chaque mode de transfert de chaleur fait appel à une condition frontière différente.

3.6 CONDITIONS AUX LIMITES

Les conditions aux limites expriment comment, à partir de l'instant zéro, varient les frontières du corps étudié, la température ou le flux de chaleur, ou encore une combinaison des deux. Deux types de conditions aux limites existent, les conditions aux limites intérieures et les conditions aux limites extérieures. Les conditions aux limites intérieures impliquent un contact parfait ou imparfait entre deux milieux solides, alors que les conditions aux limites extérieures supposent un contact entre un corps solide et un fluide.

3.6.1 Conditions aux limites intérieures

Les conditions aux limites intérieures impliquent l'échange de chaleur entre la glace et le câble et ce contact est considéré parfait. Dans cette approche, on considère que la discontinuité (câble/glace) se présente comme une surface géométrique sans épaisseur, donc sans capacité calorifique. Cela implique d'une part la conservation du flux de chaleur et d'autre part la continuité des températures. Puisque le rapport entre la conductivité thermique de la glace et celle du câble (cylindre en aluminium) est négligeable (de l'ordre de 0,01), la condition frontière entre ces deux corps s'écrit :

$$\frac{\partial T_c}{\partial t} = \frac{4k}{d_c \rho_c C_{p_c}} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{r=r_0} \quad (3.45)$$

Où l'indice c désigne le câble et ρ_c et C_{p_c} sont la densité et la chaleur spécifique ; d_c est le diamètre du câble et $\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{r=r_0}$ représente le gradient de température à la surface du câble.

3.6.2 Conditions aux limites extérieures

Lorsqu'un des milieux est solide et l'autre est fluide les conditions aux limites, c'est-à-dire au contact solide-fluide, s'écrivent en fonction du type de contact entre ces deux corps. Ainsi quatre types de conditions aux limites existent : Dirichlet, Neumann, Fourier ou bien par radiation. La condition dite de Neumann impose une densité de flux de chaleur à la surface du solide (glace). Ce type de condition est rencontré dans les problèmes radiatifs mettant en jeu des flux de chaleur absorbés sans réflexion ni ré-émission. Dans ce cas, la valeur du flux de chaleur se trouve totalement indépendante de l'état surfacique de la glace. La quantité du flux de chaleur absorbée par un volume infinitésimal autour du nœud (i) à l'instant t_s , $q(\vec{r}_o^i, t_s)$ n'est pas fonction de la température de ce nœud, mais elle s'exprime plutôt en fonction d'une quantité moyenne qui dépend seulement du temps :

$$q(\vec{r}_o^i, t_s) = q_s(t) \quad (3.46)$$

La condition aux limites de type Fourier impose au fluide ambiant une température T_{air} au large et un coefficient de convection h pour l'échange entre la glace et l'air. L'échange

de chaleur se fait alors par convection ou par sublimation. Dans ces deux cas, la quantité du flux de chaleur dépend totalement de la nature et de la température de surface de la glace. En effet, la quantité de chaleur $q(\vec{r}_o^i, t_s)$ est fonction de la température du nœud $T(\vec{r}_o^i, t_s)$ et de la température de l'air (T_{air}). Ce type de condition s'exprime par la relation suivante :

$$q(\vec{r}_o^i, t_s) = h(T(\vec{r}_o^i, t_s) - T_{air}) \quad (3.47)$$

h dépend d'un certain nombre de paramètres physiques, à savoir la localisation de la couche limite, l'état de la surface de contact, la géométrie du système, la vitesse vectorielle du fluide ainsi que sa nature et ses propriétés physiques.

3.7 TRANSFERT DE CHALEUR EN RÉGIME HUMIDE

La glace lorsqu'elle absorbe une quantité d'énergie, sa température augmente d'une valeur négative jusqu'à 0 °C. À la température de fusion, toute l'énergie absorbée est utilisée sous forme de chaleur latente et la glace commence à fondre. Dans ce cas, une mince couche d'eau est formée à la surface du dépôt de glace. Une des hypothèses du modèle numérique (§4.2) est de considérer la couche d'eau négligeable. On suppose que la vitesse du vent est assez élevée pour sécher ou évaporer la couche d'eau. Plus loin, au paragraphe (§7.2) cette hypothèse va être validée et les résultats fournis par le modèle numérique sont comparables à ceux réalisés en laboratoire.

Le modèle mathématique décrit par les équations 3.1, 3.2 et 3.3 correspond à un transfert de chaleur dans un régime de fonte sec (air/glace). Par contre, si on veut tenir compte de la présence de l'eau à la surface du dépôt de glace, le transfert de chaleur est effectué dans un régime humide. Aux équations (3.1 à 3.3) devra s'ajouter un bilan de masse entre la glace et la couche d'eau et la couche d'eau et l'air de même que les équations de Navier Stocks pour modéliser l'écoulement d'eau à la surface de la glace. L'écoulement d'eau est dû à la gravité combinée à la vitesse du vent.

3.8 CONCLUSION

La méthode des éléments finis de frontière a été utilisée pour étudier le problème de fonte à deux dimensions en considérant des propriétés thermiques constantes. Cette méthode a l'avantage de réduire de un la dimension du problème ainsi que de s'adapter aux problèmes de changement de phase. Le traitement mathématique a permis d'obtenir une formulation intégrale de l'équation (3.4) par introduction de la fonction de Green. L'équation finale (3.16) a été traitée numériquement dans le temps en utilisant la technique du pas du temps, et dans l'espace avec des éléments linéaires. Cela a permis d'obtenir un système d'équations matriciel après introduction des conditions initiales et les conditions aux limites. Finalement, deux types de conditions aux limites extérieures (glace/câble) et intérieurs (glace/air), ont été discutées.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS NUMÉRIQUES

Les paramètres physiques de la glace et du câble ainsi que les hypothèses de départ, qui ont servi à la modélisation de la fonte de la glace, sont cités aux sections (§4.1) et (§4.2) respectivement. L'organigramme du programme informatique ainsi qu'un exemple de maillage font l'objet de la section (§4.3). Le modèle numérique est validé par des solutions analytiques monodimensionnelles, selon les types de conditions frontières (§4.4.1.1) et (§4.4.1.2). Un bilan d'énergie permet de connaître l'évolution de l'erreur relative lors de la phase de pré-fusion (§4.4.1.3) et de fusion (§4.4.2.1). Des exemples d'applications et de calculs obtenus par le modèle numérique sont donnés à la section (§4.5). Une partie des résultats est comparée à ceux obtenus par le montage expérimental.

4.1 PARAMÈTRES DE LA MODÉLISATION

A. Le dépôt de glace

La forme d'un manchon de glace accumulée autour des câbles et conducteurs de transport d'énergie électrique se situe généralement entre une géométrie circulaire et une géométrie elliptique. Étant donné que la forme circulaire s'apprête facilement en laboratoire, et dans le but de valider le modèle numérique par des tests expérimentaux, la forme circulaire fût choisie. Deux épaisseurs de glace sont utilisées dans les simulations numériques, soit 10 mm et 25 mm. La conductivité thermique (k), la chaleur massique à pression constante (C_p), la masse volumique (ρ) ainsi que la chaleur latente de fusion de la glace (L) sont données au tableau (4.1).

B. Le câble

Les paramètres physiques du câble utilisés dans le modèle numérique sont ceux d'un cylindre en Aluminium, voir tableau (4.1).

	k (W/m.K)	C_p (J/kg.K)	ρ (kg/m ³)	L (kJ/kg)
Glacé	2,5	1925	912	333
Câble	237	903	2702	- - -

Tableau 4.1 : Paramètres physiques de la glace et du câble

C. La température de l'air et la vitesse du vent

Dans le cas du délestage naturel par fonte, la température de l'air et la vitesse du vent sont les paramètres météorologiques à considérer. La température de l'air dans les simulations numériques a une valeur égale à 2 °C, alors que la vitesse du vent est égale à 10, 20 et 30 m/s.

D. La conductivité thermique de la glace

Elle intervient dans le mode de transmission de chaleur provoqué par la différence de température dans le dépôt de glace. La valeur est comprise entre 2 et 3 W/m.K (chapitre 2). La conduction devient le seul mécanisme intervenant dans le transfert de chaleur dans la glace, d'où la nécessité de bien déterminer l'influence de ce paramètre sur les résultats du calcul. Les figures (4.1) et (4.2) montrent une comparaison entre différentes valeurs de conductivité thermique pour deux types de conditions frontières. Ces résultats sont obtenus avec des solutions analytiques (équations (4.1) et (4.2) respectivement). Ces figures montrent clairement que les courbes sont similaires et donnent la même distribution de température. La valeur de 2,5 W/m.K fut donc retenue.

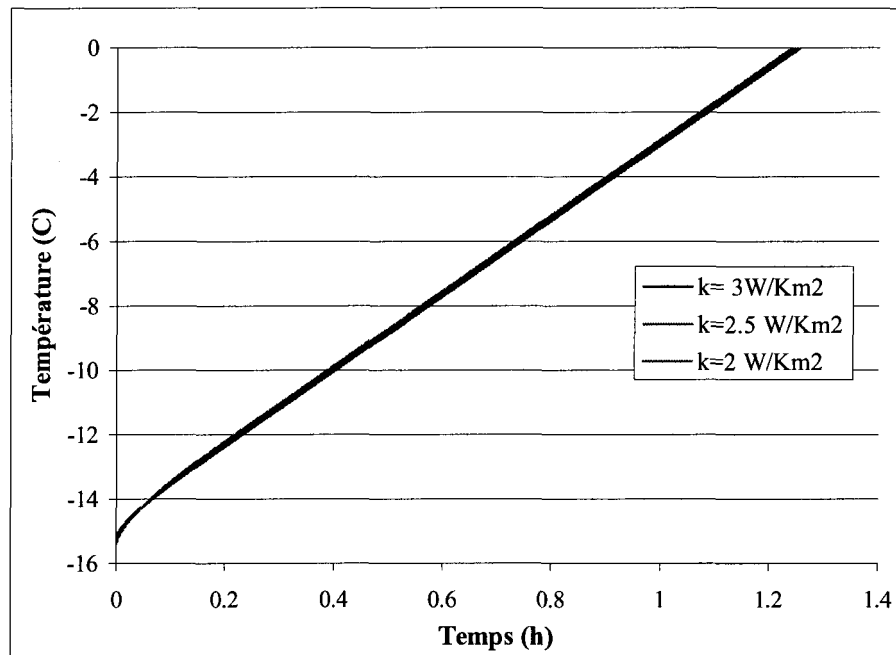


Figure 4.1 : Comparaison entre différentes conductivités thermiques ($q = 100 \text{ W/m}^2$)

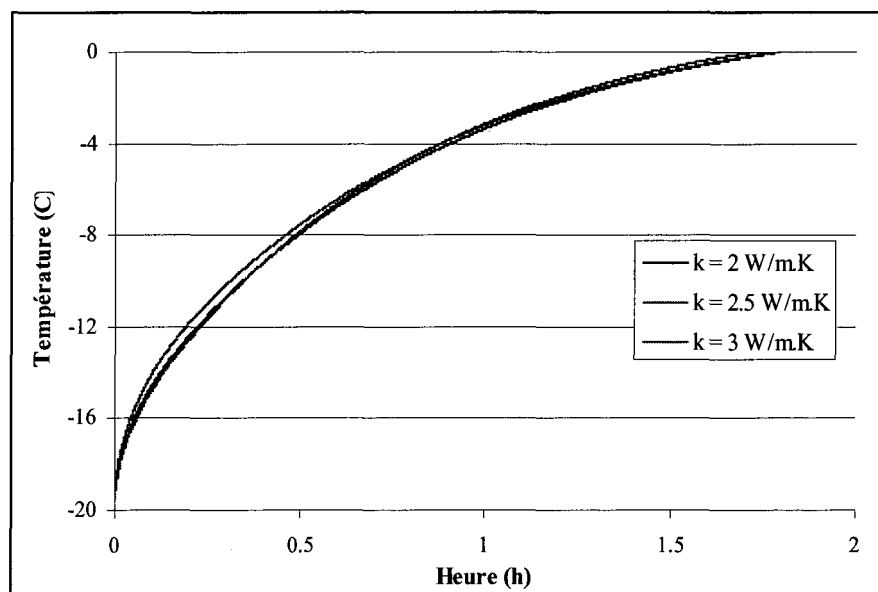


Figure 4.2 : Comparaison entre différentes conductivités thermiques ($h = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$)

4.2 HYPOTHÈSES DE DÉPART

La modélisation du délestage naturel par fonte fait appel aux hypothèses de départ suivantes :

- L'accumulation de glace sur le câble est absente pendant la période du délestage,
- le dépôt de glace est considéré comme un solide homogène et isotrope sans fissuration,
- les paramètres physiques du câble et de la glace (conductivité thermique, masse volumique, chaleur massique et chaleur latente de fusion de la glace) sont constants et indépendants de la température,
- pendant la période du délestage, la vitesse du vent ainsi que la température de l'air sont constantes et ne varient pas en fonction du temps. Par contre, on peut modifier ces paramètres d'une simulation à autre,
- toute la glace fondue est enlevée immédiatement de la surface du dépôt,
- l'effet Joule (courant électrique qui traverse le câble) est absent durant la période du délestage.

4.3 PROGRAMME INFORMATIQUE

Le programme informatique servant à simuler le délestage par fonte à deux dimensions est écrit en langage Fortran. Une partie du programme développé par Ouellet, R. (1987) a

été utilisée pour le calcul des matrices [B], [H] et [G]. Le programme se divise en deux sous-routines ; une pour la phase de pré-fusion et une autre pour la phase de fusion. La figure (4.3) montre l'organigramme du programme informatique.

Pour l'accumulation de glace dont l'épaisseur radiale est de 10 mm, 25 éléments linéaires sont utilisés dans le but de discrétiser la frontière de dépôt de glace et 456 éléments triangulaires linéaires pour le maillage du domaine intérieur de la glace et du câble. Avec une épaisseur radiale de 25 mm, 41 éléments linéaires sont utilisés à la frontière et 760 éléments triangulaires linéaires au maillage intérieur. La figure (4.4) montre la configuration de maillage utilisée quand l'épaisseur radiale de glace est égale à 10 mm.

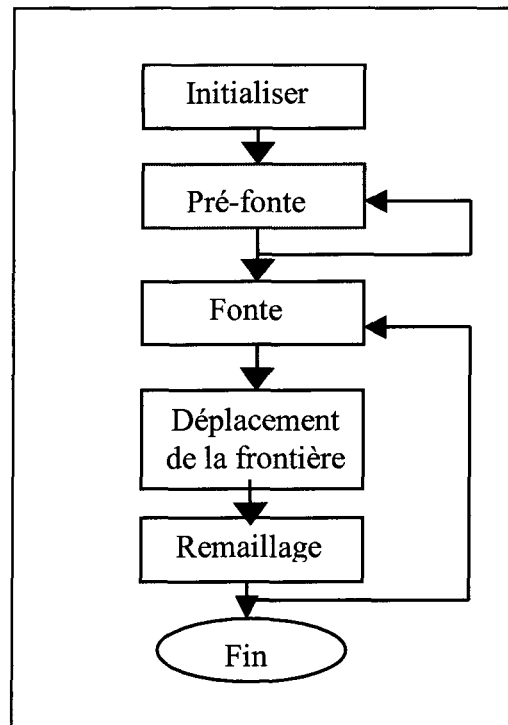


Figure 4.3 : Organigramme du programme informatique

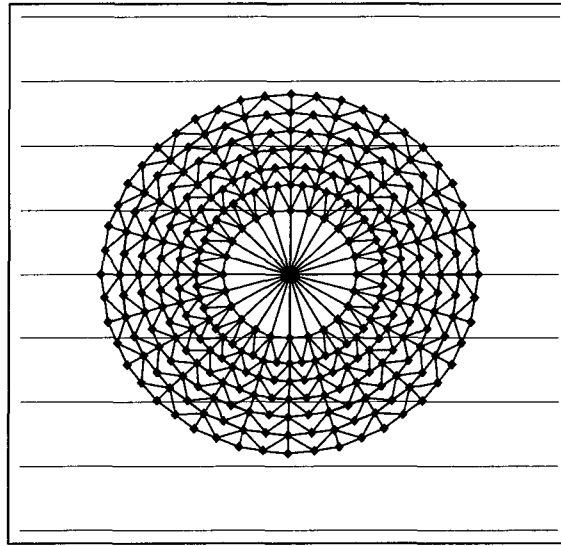


Figure 4.4 : Exemple de maillage utilisé ($\varepsilon = 10$ mm)

4.4 VALIDATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE PAR DES SOLUTIONS ANALYTIQUES

4.4.1 Phase de pré-fusion

La phase de pré-fusion est la phase où il y a de la conduction pure. Pendant cette phase, la glace ne subit pas de changement de phase en passant de l'état solide à l'état liquide. Par contre, sa température augmente par absorption de chaleur, d'une valeur négative à 0 °C.

Dans des conditions aux limites bien définies, le système d'équations (3.2) et (3.4) possède des solutions analytiques monodimensionnelles dans le cas du régime transitoire sans changement de phase [Carslaw, H.S. et J.C. Jaeger, (1959)]. Par contre, ces solutions sont limitées à des géométries simples comme le mur semi-infini, le cylindre infini et la sphère infinie.

Avant de considérer des problèmes de nature complexe, il est très important d'étudier le comportement de la méthode des éléments finis de frontière décrite au chapitre 3. Une des méthodes de validation du modèle numérique consiste à le comparer avec la solution analytique monodimensionnelle du cylindre infini. Toutefois, ce type de validation reste partiel et insuffisant. Puisque le modèle numérique est bidimensionnel, on impose un flux de chaleur uniforme sur la surface latérale de la glace. L'échange thermique sera donc monodimensionnel et les résultats numériques peuvent être comparés à ceux de la solution analytique. Cependant, ces solutions analytiques dépendent de la condition frontière appliquée à la surface de la glace. Dans les deux paragraphes suivants, deux types de conditions sont considérés : la condition frontière de type Neumann (flux de chaleur) et la condition frontière de type Fourier (coefficient de convection).

4.4.1.1 Condition frontière de type Neumann

La solution analytique monodimensionnelle du système d'équations (3.2) et (3.4) dans le cas du cylindre infini est donnée par Carslaw, H.S. et J.C. Jaeger, (1959) :

$$T(t) = \frac{2qt\alpha}{kr} + \frac{qr}{k} \left\{ \frac{1}{4} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp\left(\frac{-\alpha a_n^2 t}{r^2}\right)}{a_n^2} \right\} + T_i \quad (4.1)$$

Ainsi, k et α désignent respectivement la conductivité thermique et la diffusivité thermique de la glace, q le flux de chaleur imposé à la surface latérale de la glace, t le temps exprimé en secondes, r le rayon de l'accumulation cylindrique qui vaut 28 mm dans le cas où l'épaisseur radiale de la glace est 10 mm et a_n les racines positives de la fonction de Bessel du premier ordre.

Exemple de validation :

Dans le cas où la température initiale du dépôt de glace est -10°C et l'épaisseur radiale de la glace est 10 mm, la solution analytique calculée par l'équation (4.1) ainsi que la solution numérique sont présentées à la figure (4.5). Ces résultats s'appliquent à un flux de chaleur uniforme de l'ordre de 100 W/m^2 . Comme le montre la figure (4.5), les deux courbes sont presque identiques et l'écart de température maximal $|T_{\text{numérique}} - T_{\text{analytique}}|$ entre les deux courbes ne dépasse pas $0,2^\circ\text{C}$.

Le tableau (4.2) résume le temps de pré-fusion pour différents flux de chaleur (50, 100, 200 et 500 W/m^2). D'après ce tableau, l'écart maximal entre la température calculée par la solution analytique et celle trouvée numériquement ne dépasse pas $0,6^\circ\text{C}$. Également, on remarque que cette valeur a tendance à augmenter avec la valeur du flux de chaleur.

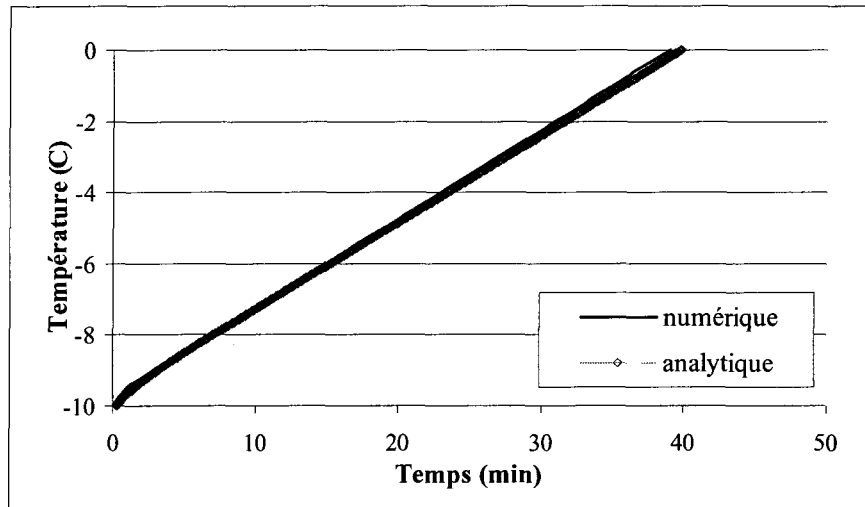


Figure 4.5 : Comparaison entre la solution analytique et numérique de la période de pré-fusion, ($q=100 \text{ W/m}^2$)

Flux de chaleur	50 W/m ²	100 W/m ²	200 W/m ²	500 W/m ²
Solution analytique	4847 s	2340 s	1161 s	424 s
Solution numérique	4770 s	2390 s	1140 s	410 s
L'écart maximal de température	0,1 °C	0,2 °C	0,4 °C	0,6 °C

Tableau 4.2 : Comparaison entre les temps de pré-fusion de la solution numérique et analytique

4.4.1.2 Condition frontière de type Fourier

Carslaw, H.S. et J.C. Jaeger, (1959) ont donné une solution analytique du système d'équations (3.2) et (3.4) dans le cas du cylindre infini. L'équation (4.2) est valide lorsqu'on impose une condition frontière de type Fourier avec un coefficient de convection h constant.

$$\frac{T - T_{air}}{T_g - T_{air}} = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp(-\xi_n^2 F_o) \cos(\xi_n x^*) \quad (4.2)$$

Dans cette relation, T_{air} est la température de l'air, T_g la température de la glace, C_n une constante qui dépend du nombre de Fourier ($F_o = \frac{t\alpha}{D^2}$) et D le diamètre total du système câble-glace. Finalement, ξ_n est la valeur propre qui dépend du nombre de Biot ($Bi = \frac{hD}{k}$). Elle est tabulée dans la plupart des livres de transfert de chaleur [Incropera, F.P. et D.P. DeWitt (1990)].

Exemple de validation :

Dans le cas où la température initiale du dépôt de glace est -10°C , l'épaisseur du dépôt de glace est 10 mm, la solution analytique calculée par l'équation (4.2) ainsi que la solution numérique sont présentées à la figure (4.6). Ces résultats figurent pour une vitesse du vent égale à 20 m/s et une température d'air de 2°C . Comme le montre la figure (4.6),

les deux courbes sont similaires alors que l'écart maximal entre les deux courbes

$|T_{numérique} - T_{analytique}|$ est de l'ordre de 0,34 °C.

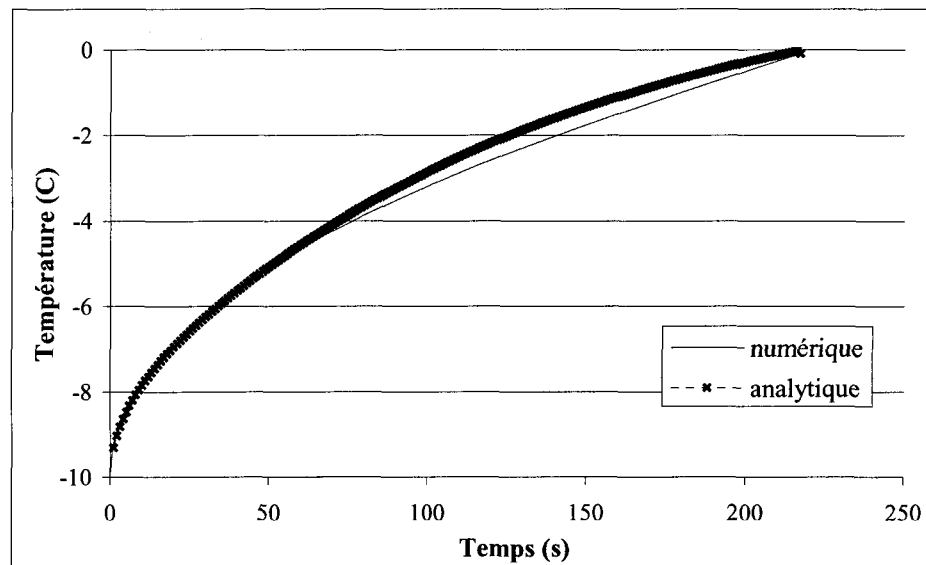


Figure 4.6 : Comparaison entre la solution numérique et analytique ($V_{air}=20$ m/s)

4.4.1.3 Calcul de l'erreur relative

Afin de qualifier la tendance des résultats lors de la phase de pré-fusion, l'erreur relative commise sur le bilan d'énergie a été calculée à chaque pas de temps. Ce calcul devient nécessaire lorsqu'on ne dispose pas de solution analytique.

$$Erreur\ relative = \left(\frac{E_{absorbée} - E_{fournie}}{E_{fournie}} \right) * 100 \quad (4.3)$$

Où $E_{absorbée}$ et $E_{fournie}$ représentent respectivement l'énergie absorbée par la glace et l'énergie fournie pour la glace durant chaque pas de temps. Étant donné que le modèle numérique est bidimensionnel et qu'un bilan d'énergie doit être calculé pour un solide tridimensionnel, la troisième dimension du dépôt de glace est prise égale à un mètre. L'énergie absorbée par la glace et l'énergie fournie pour la glace pendant un pas de temps Δt_s sont données par les relations (4.4) et (4.5) respectivement :

$$E_{absorbée}(\Delta t_s) = \int_{\Omega(0)} (C_p \rho (T(\vec{r}_o, t) - T(\vec{r}_o, t - \Delta t_s))) d\Omega \quad (4.4)$$

$$E_{fournie}(\Delta t_s) = \int_{t-\Delta t_s}^t \int_{\Gamma(0)} -q(\vec{r}_o, \tau) d\Gamma d\tau \quad (4.5)$$

Si l'on reprend l'exemple décrit au paragraphe (§4.4.1.1), la variation de l'erreur relative commise sur le bilan d'énergie et calculée par les équations (4.3) à (4.5) se trouve à la figure (4.7). D'après cette figure, l'erreur relative commise sur le bilan d'énergie totale est élevée durant les premières minutes de la période de pré-fusion. Cette élévation est due à l'application instantanée et brusque d'une très grande quantité de chaleur à la surface de la glace. Le tableau (4.3) résume la moyenne arithmétique de l'erreur relative pour différents flux de chaleur. Il montre également que cette quantité augmente avec le flux de chaleur.

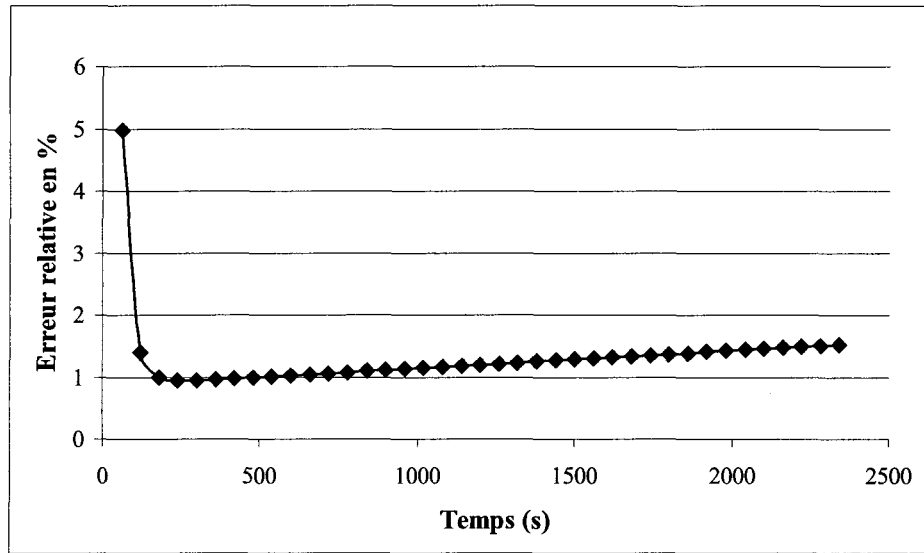


Figure 4.7 : L'erreur relative commise sur le bilan d'énergie durant la phase de pré-fusion ($q=100 \text{ W/m}^2$)

Flux de chaleur	50 W/m ²	100 W/m ²	200 W/m ²	500 W/m ²
Erreur relative moyenne	0,91 %	1,32 %	1,62 %	2,17 %

Tableau 4.3 : L'erreur relative moyenne commise sur le bilan d'énergie de la phase de pré-fusion

4.4.2 Phase de fusion

Comme dans le cas de la phase de pré-fusion, des solutions analytiques monodimensionnelles de fonte existent. Ces solutions existent pour des géométries et des

conditions frontières limitées. Elles sont connues sous le nom du problème de Stephan [Bazitoglu, Y. et P.G. Kroeger, (1990)].

À un certain moment et après la phase de pré-fusion, la température interne de la glace, qui n'a pas encore subi de fonte, atteint le point de fusion sans pour autant provoquer une fonte générale du manchon de glace. En effet, la quantité de chaleur latente emmagasinée par le domaine n'est pas suffisante pour provoquer une fonte totale et instantanée. Dans cette situation, le gradient de température $\frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial n}$ est nul et l'équation du déplacement de la

frontière (3.26) devient :

$$\Delta \bar{S}(\vec{r}_o^i) = \frac{(t_{s+1} - t_s)}{L\rho} q(\vec{r}_o^i, t_s) \bar{m}_i \quad (4.6)$$

Afin de valider les résultats du modèle numérique obtenus par l'équation (4.6), une solution analytique est utilisée (Éq. 4.7). Dans ce cas, le déplacement de la frontière atteint une vitesse de fonte constante en régime établi [Rohsenow, W.M et Choi, H.Y. (1961)] :

$$V_{\text{fonte}}(\vec{r}, t) = \frac{1}{\rho L} q(\vec{r}, t) \bar{m}_i \quad (4.7)$$

Exemple de validation :

Soit un flux de chaleur de 100 W/m² appliqué à la surface latérale d'un dépôt de glace cylindrique. À partir de l'équation (4.7), la vitesse de fonte (V_{fonte}) est de l'ordre 1,18 mm/h, alors que l'utilisation de l'équation (4.6) donne une valeur de 1,21 mm/h. Le tableau (4.4) résume les vitesses de fonte de différents flux de chaleur. D'après ce tableau

on remarque que l'erreur relative entre la vitesse de fonte calculée par la solution analytique et celle trouvée numériquement ne dépasse pas 2,5 %.

$$erreur\ relative = \frac{V_{numérique} - V_{analytique}}{V_{analytique}} * 100 \quad (4.8)$$

Flux de chaleur	50 W/m ²	100 W/m ²	200 W/m ²	500 W/m ²
Solution analytique	0,59 mm/h	1,18 mm/h	2,37 mm/h	5,93 mm/h
Solution numérique	0,60 mm/h	1,21 mm/h	2,42 mm/h	6,04 mm/h
Erreur relative (Éq. 4.8)	1,7 %	2,5 %	2,1 %	1,85 %

Tableau 4.4 : Comparaison entre les vitesses de fonte

4.4.2.1 Calcul de l'erreur relative

L'équation (4.9) définit l'erreur relative commise sur le bilan d'énergie net lors de la phase de fusion dans le cas le plus général :

$$Erreur\ relative\ globale = \left(\frac{E_{absorbée\ totale} - E_{fournie\ totale}}{E_{fournie\ totale}} \right) * 100 \quad (4.9)$$

$$E_{absorbée\ totale} = - \int_{\Omega(0)} C_p \rho T(\vec{r}_o, 0) d\Omega + L\rho \left(\int_{\Omega(0)} d\Omega - \int_{\Omega(t_F)} d\Omega \right) \quad (4.10)$$

$$E_{fournie\ totale}(\Delta t_s) = \int_0^{t_F} \int_{\Gamma(\tau)} -q(\vec{r}_o, \tau) d\Gamma d\tau \quad (4.11)$$

Dans ces relations, $E_{\text{absorbée totale}}$ représente l'énergie nécessaire pour amener la glace à zéro degré plus l'énergie nécessaire pour la faire fondre totalement, $E_{\text{fournie totale}}$ est l'énergie fournie à la glace durant tout le processus de fonte. Le tableau (4.5) résume l'erreur relative commise durant la phase de fusion pour différents flux de chaleur.

Flux de chaleur	50 W/m ²	100 W/m ²	200 W/m ²	500 W/m ²
Erreur relative	-0,72 %	-0,71 %	-0,71 %	-0,78 %

Tableau 4.5 : L'erreur relative commise sur le bilan d'énergie pendant la fusion

4.5 EXEMPLES NUMÉRIQUES

Les propriétés physiques de la glace et du câble, ainsi que les conditions initiales sont les mêmes pour toutes les simulations numériques :

- La température initiale de la glace et du câble est égale à -10 °C,
- le diamètre du câble est égal à 36 mm,
- l'épaisseur radiale de la glace (ϵ) a deux valeurs distinctes : 10 mm et 25 mm,
- l'albédo de la glace est égal à 0,5.

4.5.1 Flux de chaleur constant sur la surface latérale de la glace

Dans le cas où le flux de chaleur est constant et symétrique sur toute la surface latérale de la glace, des simulations numériques ont été effectuées pour différents flux de chaleur : 50, 100, 200 et 500 W/m². Les résultats sont regroupés dans les tableaux (4.6) et (4.7) lorsque l'épaisseur de glace est de 10 mm et 25 mm respectivement.

Flux de chaleur	50 W/m ²	100 W/m ²	200 W/m ²	500 W/m ²
Durée de pré-fusion	4770 s	2340 s	1140 s	410 s
Erreur relative (Éq. 4.3)	0,91 %	1,32 %	1,62 %	2,17 %
Vitesse de fonte (Éq. 4.4)	0,60 mm/h	1,21 mm/h	2,42 mm/h	6,04 mm/h
Durée totale de fonte	60755 s	30435 s	15265 s	6175 s
Erreur relative (Éq. 4.7)	-0,72 %	-0,70 %	-0,71 %	-0,78 %

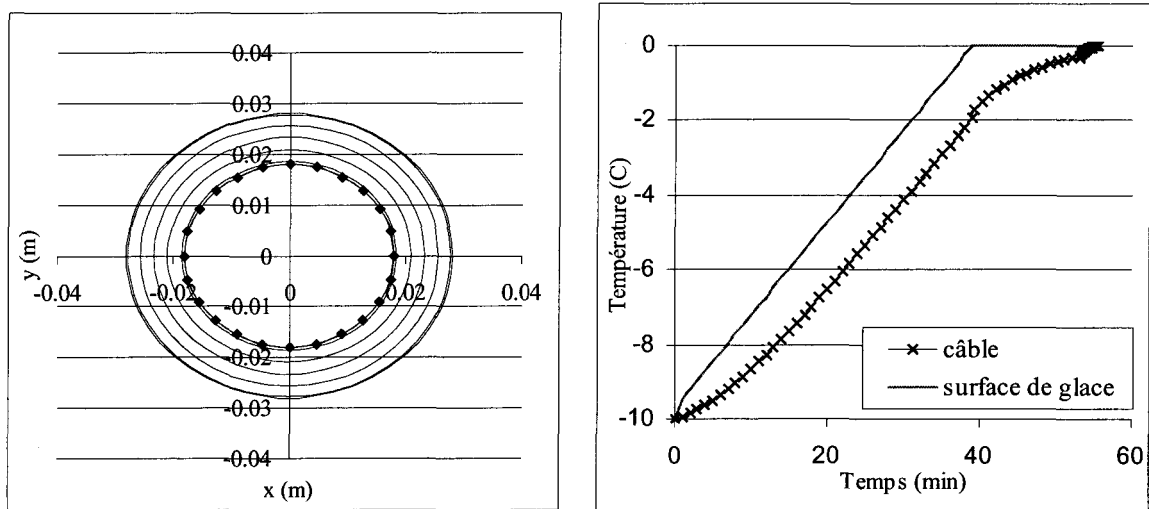
Tableau 4.6 : Résultats numériques pour une épaisseur de glace de 10 mm

Flux de chaleur	50 W/m ²	100 W/m ²	200 W/m ²	500 W/m ²
Durée de pré-fusion	7390 s	3600 s	1710 s	590 s
Erreur relative (Éq. 4.3)	-0,84 %	0,22 %	0,21 %	0,94 %
Vitesse de fonte (Éq. 4.4)	0,60 mm/h	1,21 mm/h	2,42 mm/h	6,04 mm/h
Durée totale de fonte	151980 s	76160 s	38265 s	15445 s
Erreur relative (Éq. 4.7)	-1,01 %	-1,11 %	-1,39 %	-1,67 %

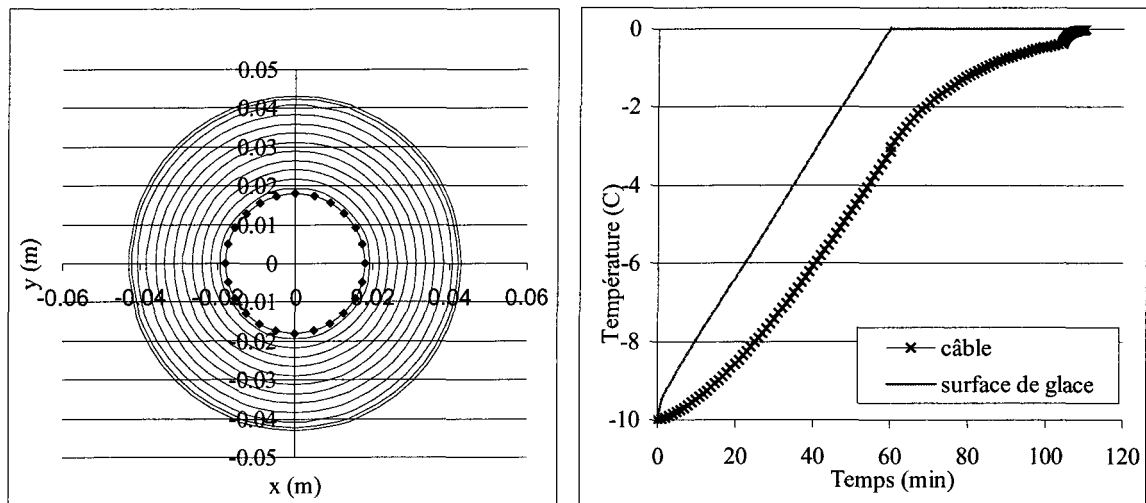
Tableau 4.7 : Résultats numériques pour une épaisseur de glace de 25 mm

Les figures (4.8) et (4.9) représentent respectivement des résultats numériques correspondant à un flux de chaleur égal à 100 W/m² et des épaisseurs radiales de 10 mm et

25 mm. Le déplacement de l'isotherme zéro à chaque pas de deux heures, ainsi que le profil de température du câble et de la glace en fonction du temps s'y retrouvent.



**Figure 4.8 : Déplacement de la frontière et profil de température
($q=100 \text{ W/m}^2$, $\varepsilon=10 \text{ mm}$)**



**Figure 4.9 : Déplacement de la frontière et profil de température
($q=100 \text{ W/m}^2$, $\varepsilon=25 \text{ mm}$)**

Les figures (A4.1) à (A4.6) en annexe montrent les résultats du déplacement de la frontière de glace et l'évolution de la température de contact entre la glace et le câble, dans le cas où le flux de chaleur égal 50, 200 et 500 W/m².

4.5.2 Flux de chaleur constant et perpendiculaire à un nœud situé sur la moitié supérieure de la glace

Dans le cas où le flux de chaleur est constant et perpendiculaire sur un nœud (*i*) situé à la surface latérale de la glace (figure 4.10), les quantités des flux de chaleur incidents sur les nœuds situés à gauche ou à droite du nœud (*i*) doivent être multipliées par un facteur de géométrie ($\cos \beta$) pour tenir compte de l'inclinaison de surface. Les nœuds de la moitié inférieure du dépôt de glace ne reçoivent pas le flux de chaleur puisqu'ils sont cachés par la moitié supérieure.

Les flux de chaleur sur les nœuds (*i*) et (*j*) sont respectivement : $q_i = q_0$ et $q_j = q_0 \cos \beta$.

Ainsi, β est l'angle que fait le nœud (*i*) avec le nœud (*j*) situé sur la moitié supérieure du dépôt de glace. L'équation $q_j = q_0 \cos \beta$ n'est valable que pour la composante directionnelle du flux de chaleur.

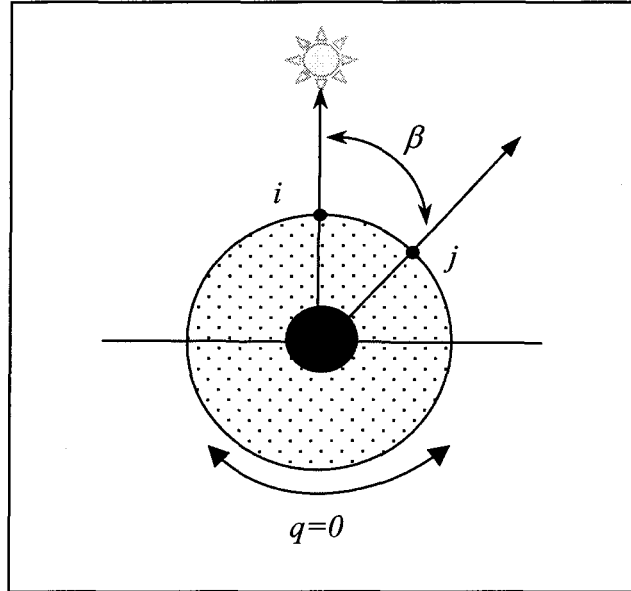


Figure 4.10 : Source de chaleur stationnaire et perpendiculaire sur le nœud (*i*)

Des tests numériques sont réalisés sur une accumulation cylindrique de température initiale de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et une épaisseur radiale de 10 mm. La figure (4.11) donne la forme du dépôt de glace après une exposition de six heures à un flux de chaleur de 100 W/m^2 . on constate que la moitié inférieure du dépôt de glace n'a pas fondu puisqu'elle est cachée par la moitié supérieure de la glace. La durée totale du processus de fonte est 6 heures. L'erreur relative commise sur le bilan d'énergie calculée par l'équation (4.9) se situe dans l'ordre de 0,63 %. La phase de pré-fusion dure 3,05 heures alors que l'erreur relative est autour de -3,66 %.

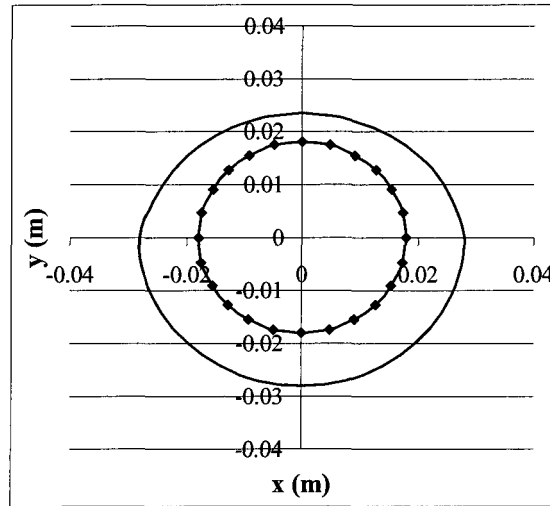


Figure 4.11 : Forme du manchon de glace après 6 heures
($q_0 = 100 \text{ W/m}^2$, $\varepsilon = 10 \text{ mm}$)

4.5.3 Flux de chaleur en fonction du temps

Lorsqu'un corps quelconque reçoit une radiation monochromatique de longueur d'onde λ et d'énergie q , il n'absorbe qu'une fraction e_λ . Il absorbe $(q.e_\lambda)$, réfléchit et diffuse vers l'extérieur l'énergie $q.(1-e_\lambda)$. Le facteur d'absorption e_λ dépend de la longueur d'onde ainsi, un dépôt de glace à 0°C qui a un facteur d'absorption extrêmement faible dans le spectre visible, absorbe et rayonne comme un corps noir dans l'infrarouge, au voisinage de $10,6 \mu\text{m}$. On peut définir un facteur d'absorption (e) pour une lumière complexe telle que la lumière solaire. Dans ce cas $(1-e)$ est l'albédo dénoté par α . Les radiations solaires incidentes dépendent de la présence et la nature des nuages dans l'atmosphère. Pour tenir compte de cet effet, on doit multiplier le flux des radiations

solaires par un facteur appelé la nébulosité [chapitre 2]. Afin de simplifier le calcul numérique et pour ne pas se perdre dans des facteurs qui dépendent de la nature et la composition des nuages (densité, teneur en H_2O , taille des gouttelettes, altitude des nuages, etc.), on considère une journée claire et sans nuages pour le calcul du taux de fonte de la glace par les radiations solaires.

La quantité des radiations solaire utilisées dans le calcul numérique est mesurée et publiée par Environnement Canada, Service de l'Environnement Atmosphérique [Hay, J.E. (1977), Phillips, D.W. et D. Aston (1980)]. Ces quantités incluent les radiations directes et diffuses. Les données utilisées sont celles du mois de janvier (figure 4.12). L'axe d'abscisse représente l'heure du jour et l'axe des ordonnées donne la valeur des radiations solaires incidentes en W/m^2 . Cette courbe a une distribution normale avec un maximum vers le milieu de la journée. Une approximation polynomiale de quatrième degré est employée dans le modèle numérique (Éq. 4.12). La variable (x) dans ces équations représente l'heure de la journée.

$$q_{\text{janvier}} = 0,2879 x^4 - 14,43 x^3 + 252,99 x^2 - 1808,9 x + 4499,8 \quad 8 \leq x \leq 17 \quad (4.12)$$

Pour une accumulation cylindrique de température initiale égale à $-10^\circ C$ et une épaisseur radiale initiale égale à 10 mm, des tests numériques furent réalisés. La figure (4.13) donne la forme du dépôt de glace après une exposition d'une journée aux radiations solaires du mois de janvier.

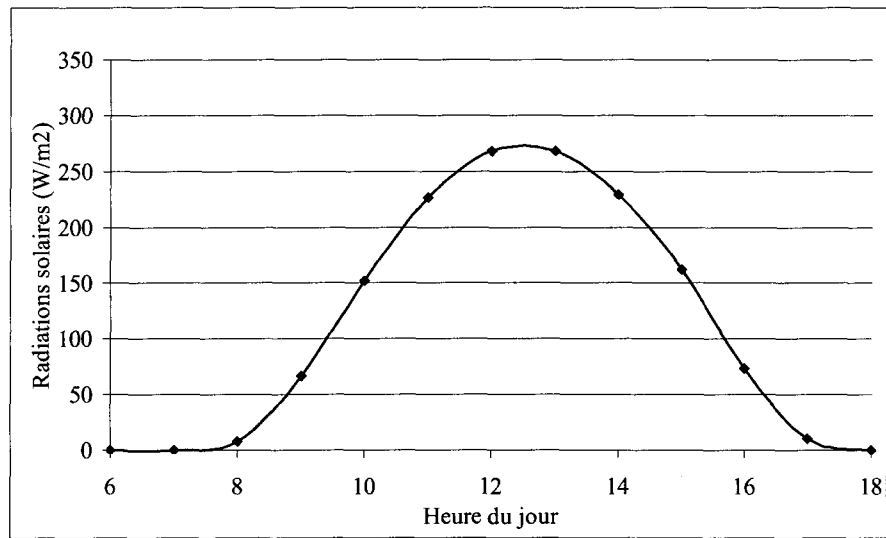


Figure 4.12 : Moyenne des radiations solaires sur une surface inclinée de 0 degré

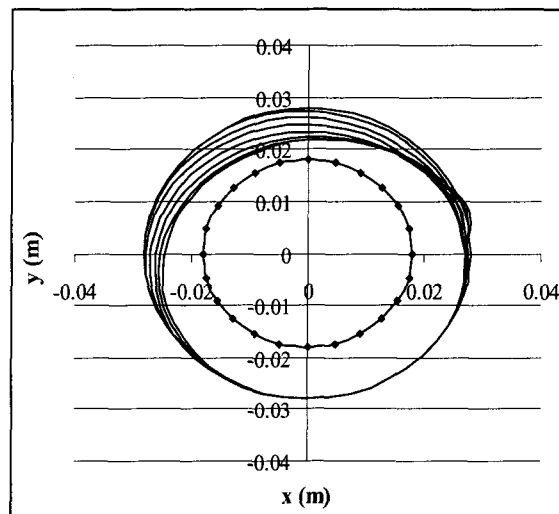
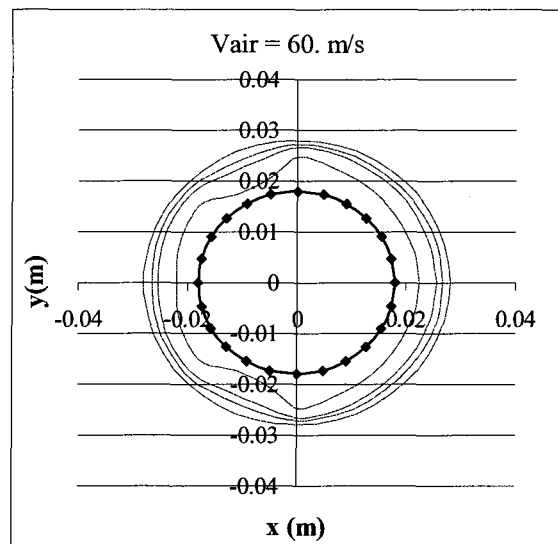
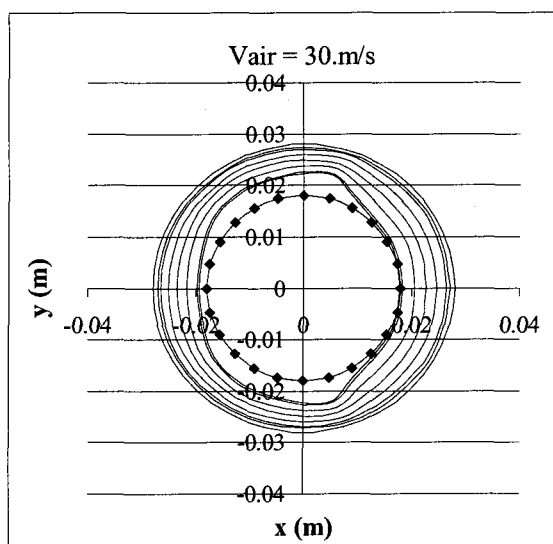
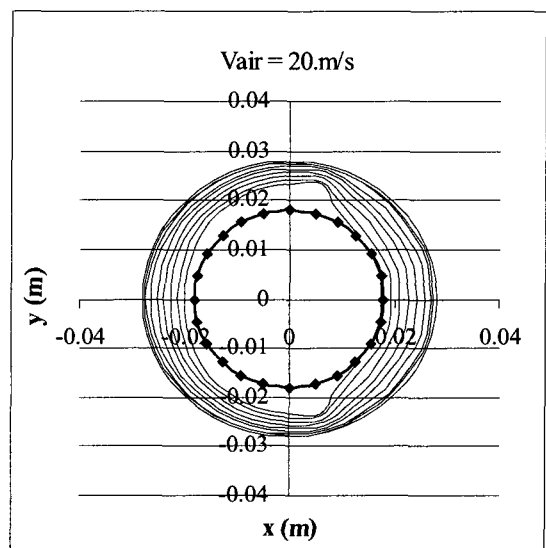
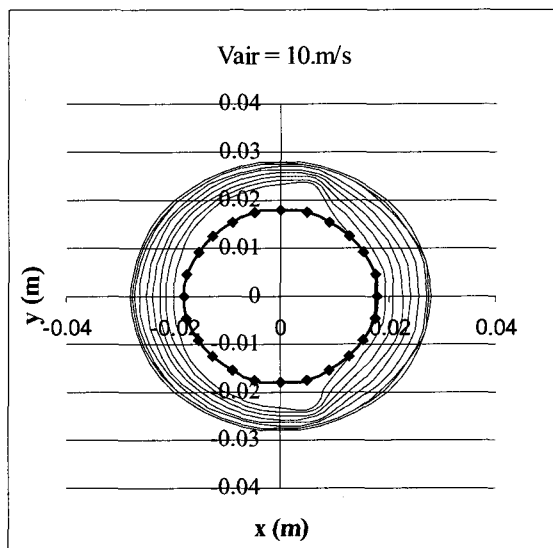


Figure 4.13 : Déplacement de la frontière de glace à chaque heure ($\varepsilon = 10$ mm)

4.5.4 Flux de chaleur par convection forcée

Lorsque la température de l'air est positive et en présence du vent, la glace peut fondre par absorption du flux de chaleur par convection forcée. Ce flux dépend de la différence de température entre le dépôt de glace et l'air et du coefficient de transfert de chaleur par convection (h). Le coefficient (h) dépend fortement de la vitesse du vent et de la forme du dépôt de glace (chapitre 2). Dans le cas des simulations numériques et pour les nombres de Reynolds comprise entre $2,2E^5$ et $0,7E^5$, le coefficient de convection est approché par un polynôme de quatrième degré à partir de la figure (2.4) alors que si le nombre de Reynolds est inférieur à $0,7E^5$ l'équation (2.15) est utilisée.

Afin de ne pas répéter les mêmes graphes et tableaux, une partie des résultats numériques concernant l'influence de la vitesse du vent sur les pourcentages de fonte ainsi que la forme des manchons de glace se trouvent au chapitre (7). Ces résultats furent comparés aux résultats des tests expérimentaux afin de valider le modèle numérique. Les figures (4.14) à (4.17) représentent respectivement le déplacement de la frontière à chaque 30 minutes pour différentes vitesses de vent (10, 20, 30 et 60 m/s). L'épaisseur radiale initiale de la glace se situe à 10 mm et la température de l'air à 2 °C. La figure (4.18) représente l'évolution des températures câble-glace et surface de la glace en fonction du temps lorsque la vitesse du vent est égale à 10 m/s et l'épaisseur radiale est 10 mm. Finalement, la figure (4.19) donne la variation de l'épaisseur de glace pour différentes vitesses de vent lorsque l'épaisseur radiale égale 10 mm et la température de l'air 2 °C.



Figures 4.14 à 4.17 : Déplacements de la frontière à chaque 30 min
($\varepsilon = 10 \text{ mm}$, $T_{\text{air}} = 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

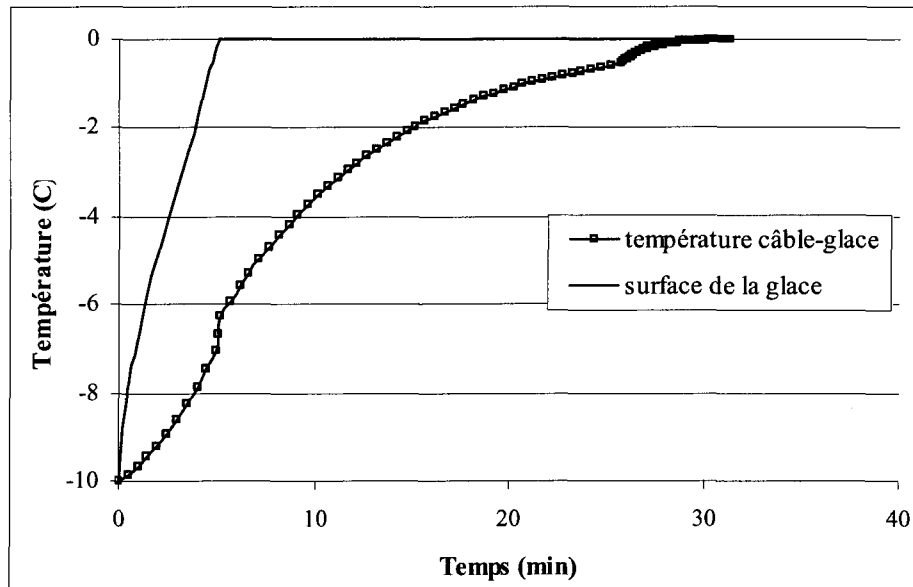


Figure 4.18 : Évolution des températures câble-glace et de la surface de la glace en fonction du temps ($V_{\text{air}} = 10 \text{ m/s}$, $\varepsilon = 10 \text{ mm}$)

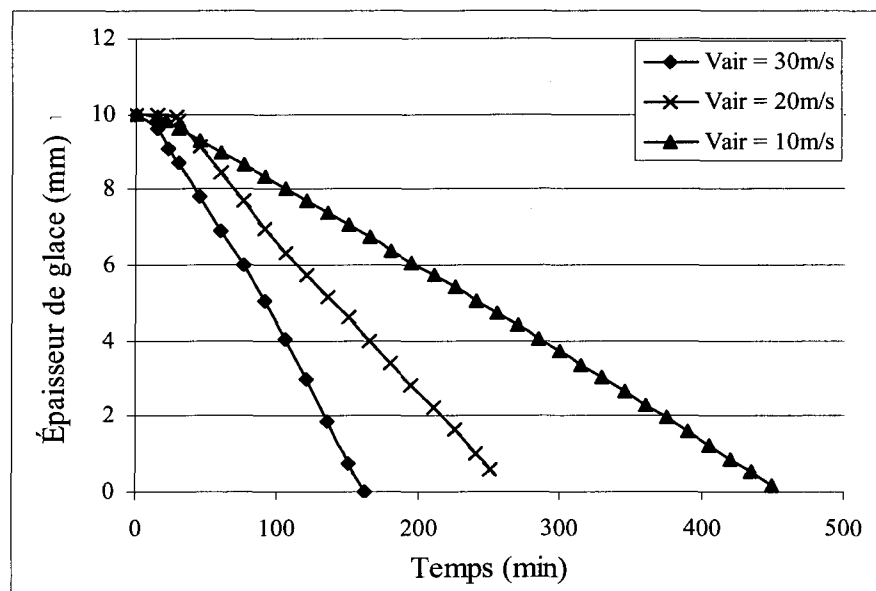


Figure 4.19 : Variation de l'épaisseur de glace à différentes vitesses de vent

4.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, les paramètres physiques de la glace et du câble, ainsi que les hypothèses de la simulation sont donnés. Une brève description du programme informatique se manifeste. Deux solutions analytiques monodimensionnelles applicables au cylindre infini ont permis de valider les résultats préliminaires du modèle mathématique. Ces solutions analytiques existent pour les deux types de conditions frontières. Par contre, lorsqu'on ne dispose pas de solution analytique, l'erreur commise sur le bilan d'énergie fut calculée à chaque pas de temps et pour les deux phases : pré-fusion et fusion. Enfin, des exemples d'application du modèle numérique sont également exposés.

CHAPITRE 5

PROCÉDURE ET MONTAGE EXPÉRIMENTAL

Les montages expérimentaux utilisés pendant les phases d'accumulation et du délestage sont exposés dans ce chapitre. Une description détaillée de la chambre climatique et de ses équipements s'y trouve. Dans les paragraphes (§5.1.1), (§5.1.2) et (§5.1.3) respectivement, le système d'arrosage, le système de refroidissement et le système de mise en rotation du câble sont décrits. La phase du délestage par fonte en absence du vent se déroule dans la chambre froide (§5.1), alors que les phases du délestage par fonte en présence du vent et par sublimation se passent dans le tunnel réfrigéré (§5.2). Les techniques de mesures de la glace fondue font l'objet du paragraphe (§5.3). La procédure expérimentale des phases d'accumulation et du délestage est expliquée aux sections (§5.4.1) et (§5.4.2). Finalement, la partie (§5.5) traite des problèmes techniques rencontrés pendant la phase du délestage.

5.1 LA CHAMBRE CLIMATIQUE

Les tests expérimentaux ont été faits dans la deuxième chambre froide du pavillon de recherche de la Chaire Industrielle CRSNG/Hydro-Québec/UQAC sur le Givrage atmosphérique des Équipements des réseaux éLectrique [CIGELE] à l'Université du Québec à Chicoutimi. Cette chambre contient tous les équipements utiles à la formation de la glace atmosphérique. Le regroupement de l'appareillage de formation de la glace dans la chambre climatique permet d'effectuer diverses manipulations dans les mêmes conditions de température, et de s'assurer ainsi de simuler de la façon la plus proche possible les conditions atmosphériques extérieures. Les dimensions de la chambre froide sont 8,24 mètres de hauteur, 6,15 mètres de largeur et 5,48 mètres de longueur.

La chambre climatique est munie des équipements suivants : un système d'arrosage, un système de refroidissement et un système de mise en rotation du câble.

5.1.1 Le système d'arrosage

Le système d'arrosage est conçu de manière à produire des gouttelettes surfondues. Les gouttelettes sont formées dans la chambre froide à l'aide d'un ensemble de six gicleurs. Le diamètre des gouttelettes dépend de la pression de l'air et de l'eau. En effet, le principe de formation des gouttelettes consiste à expulser en même temps, et à travers les gicleurs, de l'eau sous pression et de l'air comprimé. Ainsi, lorsque l'air se dilate à la pression de la chambre (pression atmosphérique), il disperse l'eau en brouillard. Ce brouillard est

constitué de gouttelettes de tailles variables qui sont entraînées par le vent produit en aval des gicleurs. Les gicleurs sont montés sur des supports oscillants et placés horizontalement l'un à côté de l'autre. Afin d'avoir un brouillard homogène, un mouvement oscillatoire des gicleurs est assuré par un système mécanique. Les gicleurs sont supportés par un convergent et la distance entre eux et le câble est égale à 2 mètres. Cette distance est suffisante pour permettre aux gouttelettes d'atteindre l'équilibre thermodynamique [Phan, C.L. et al (1976)]. La figure (5.1) montre une vue de face des gicleurs.



Figure 5.1 : Système d'arrosage

Dans le but de produire du vent, douze moteurs sont couplés deux par deux formant six sources de vent. Les moteurs sont placés en aval d'un convergent qui sert de convergent. Chaque moteur entraîne une hélice. Pour éviter que le flux d'air se propage sous une forme spirale, les moteurs sont couplés dans des sens de rotation différents. À l'intérieur du

convergent, une toile métallique en forme de nid d'abeille sert à assurer un profil turbulent de la vitesse du vent lorsque celui-ci la traverse. Le convergent a les dimensions montrées à la figure (5.2) et une largeur de 3 mètres.

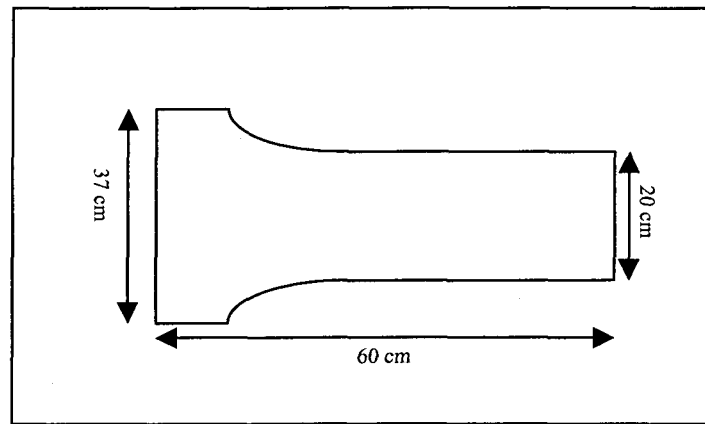


Figure 5.2 : Profil du convergent

La figure (5.3) montre le schéma du circuit d'alimentation en eau et en air des gicleurs. Les pressions sont fixées en fonction des paramètres atmosphériques de la formation de glace. Le débit d'eau de chaque gicleur est contrôlé de façon indépendante de l'extérieur et l'eau utilisée pour les tests expérimentaux provient du robinet. Toutefois, pour éviter la formation de la glace autour des gicleurs, chaque gicleur est entouré d'un fil chauffant. Enfin, les conduites d'eau au début de chaque expérience ont été purgées. Cette précaution assure l'absence de formation de glace.

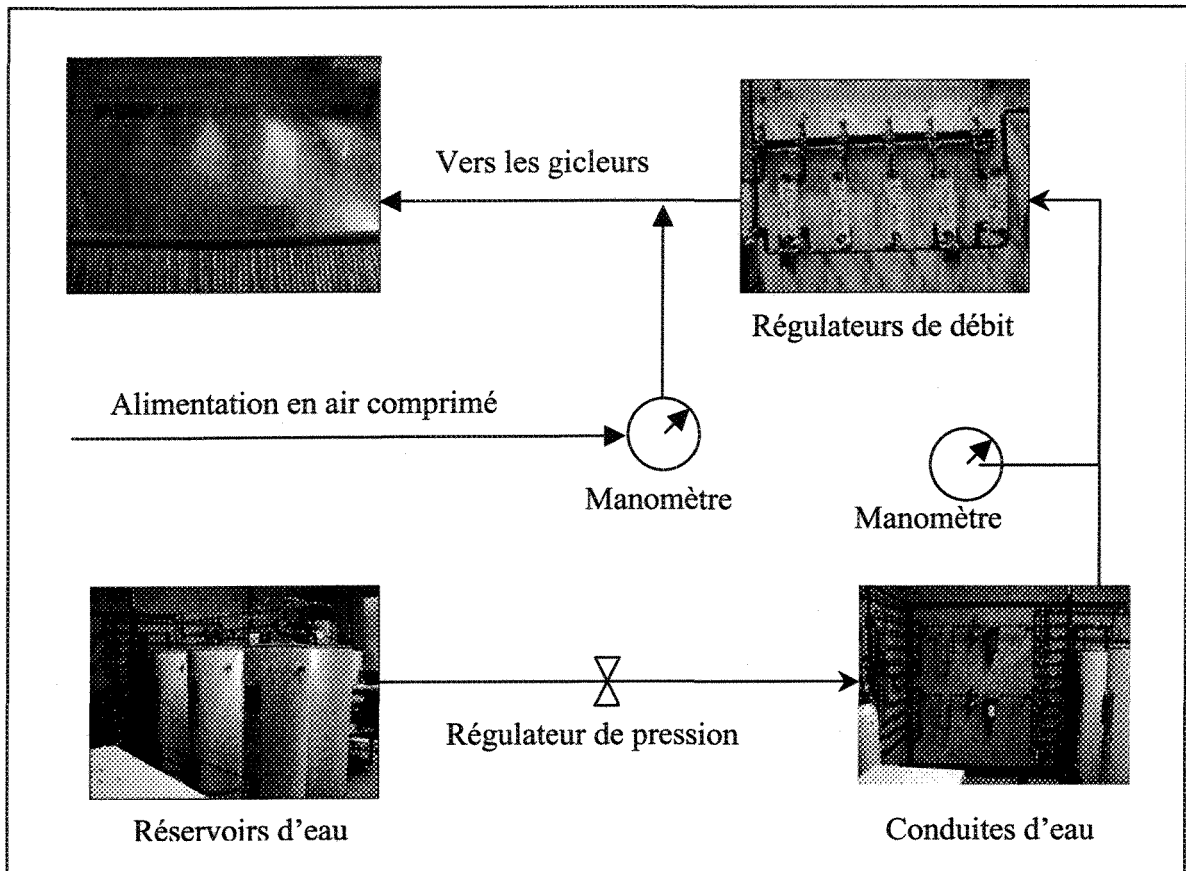


Figure 5.3 : Circuit d'alimentation en eau et en air des gicleurs

5.1.2 Le système de refroidissement

Le système de refroidissement se compose d'une unité frigorifique, suspendue au plafond de la chambre froide. L'installation d'un plafond diffuseur facilite l'échange de chaleur et uniformise la température. Des températures allant jusqu'à $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ peuvent être maintenues avec un contrôleur PID relié à un thermocouple. Les écarts maximums de température sont de \pm un degré. Généralement, un délai d'attente d'environ deux heures est

nécessaire afin d'atteindre l'uniformisation de la température des différentes composantes de la chambre.

5.1.3 Le système de mise en rotation du câble

Afin d'exposer l'ensemble de la surface latérale du câble au jet d'eau surfondue, le câble est entraîné dans une rotation sur lui-même. Le mouvement de rotation doit être uniforme et constant pour obtenir une glace de forme circulaire autour du câble. Un moteur à courant continu couplé avec un variateur de tension et un système de transmission furent utilisés. Le système de transmission a pour but de réduire la vitesse de rotation jusqu'à deux tours par minute. Au niveau du câble, deux roulements à billes et un joint universel ont été mis en place. Ils ont pour but d'éliminer la force causée par le système de transmission (courroie), et de transmettre seulement un moment de rotation. La figure (5.4) montre le système de mise en rotation du câble.

Les câbles utilisés sont deux cylindres en aluminium de 36 mm de diamètre et de 1,86 et 0,86 mètre de longueur. Le cylindre le plus long s'emploie pour le délestage naturel en absence du vent dans la chambre froide, alors que le cylindre le plus court sert aux tests dans le tunnel en présence du vent.

Dans le but d'obtenir des photos de la forme du manchon de glace après la phase de délestage, le câble fut sectionné au milieu. Un système de branchement permanent donne la possibilité de séparer les deux parties du cylindre après avoir coupé la glace (figure 5.5).

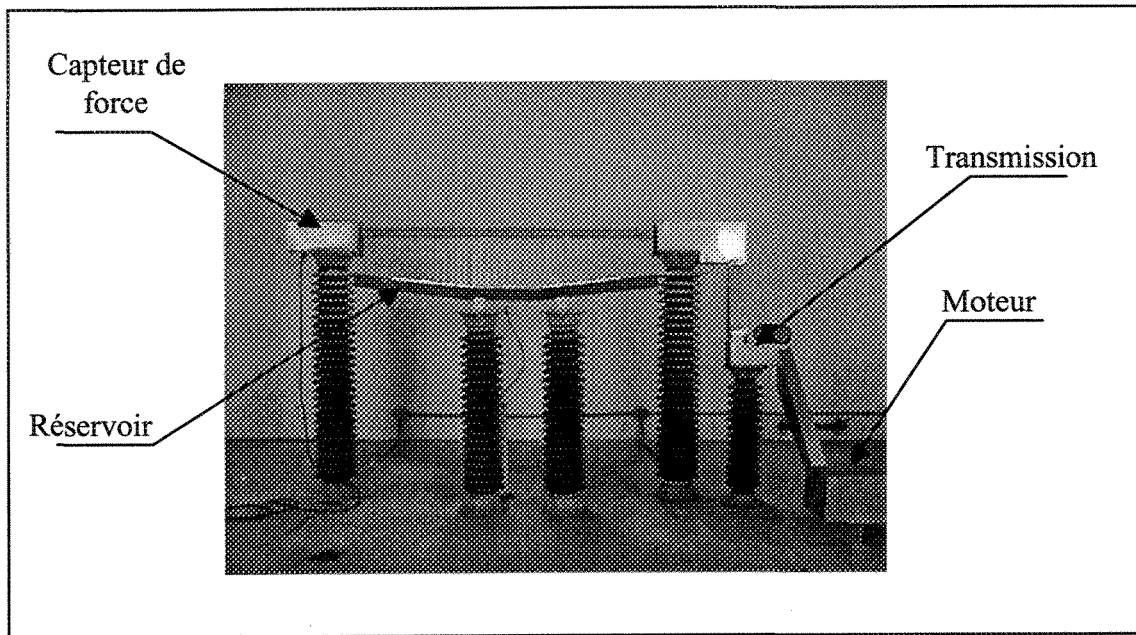


Figure 5.4 : Système de mise en rotation du câble

Deux thermocouples de type T (cuivre – constantan (alliage cuivre et nickel)) préalablement collés sur la surface du câble, avant l'accumulation, ont permis de mesurer la température de contact entre la surface du câble et la glace pendant la phase de pré-fusion. Ils se trouvent à une distance de $\frac{1}{3}$ de chaque extrémité et pour les deux câbles (0,86 et 1,8 mètres).

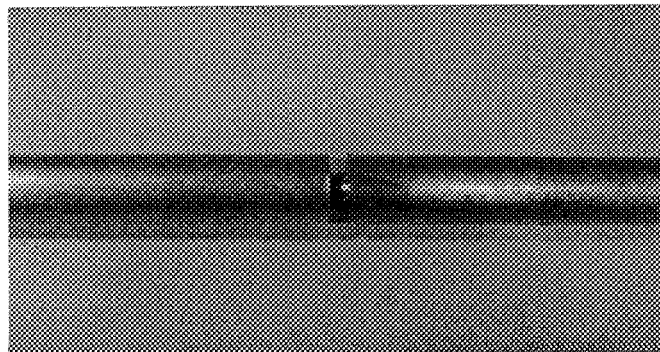


Figure 5.5 : Câble sectionné en deux

5.2 LE TUNNEL RÉFRIGÉRÉ

Le tunnel réfrigéré permet de simuler la vitesse du vent lors de la phase du délestage. Le tunnel d'environ 28 mètres possède plusieurs sections (figure 5.6). Il fonctionne en circuit fermé et il se divise en deux parties : la chambre des tests et le canal de circulation du vent. Les dimensions de la chambre sont 4,5 mètres de longueur, 3,5 mètres de largeur et 3 mètres de hauteur.

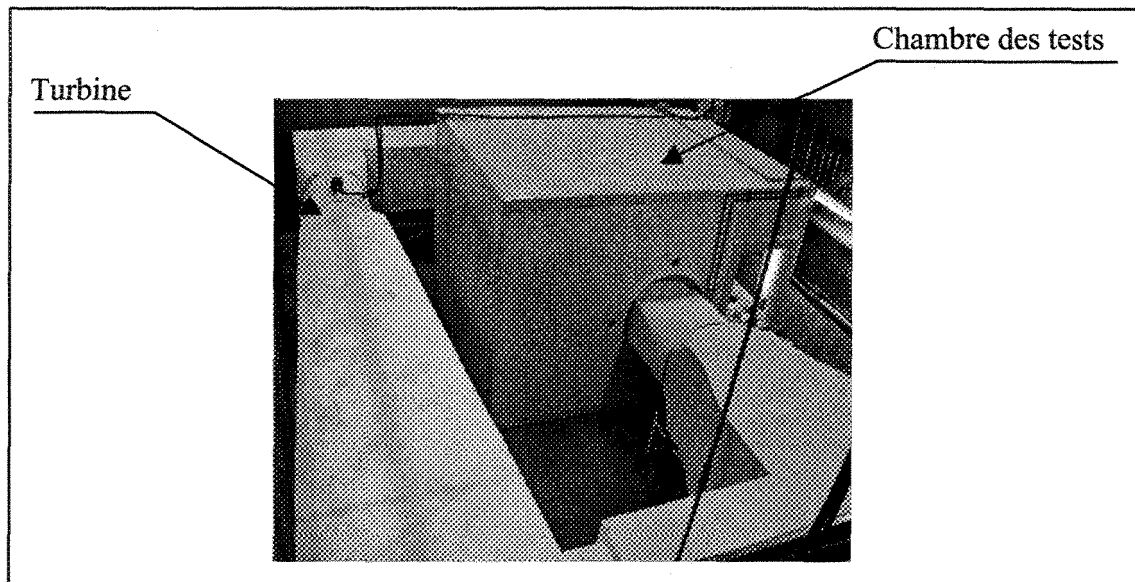


Figure 5.6 : Vue d'ensemble du tunnel

Un moteur électrique, d'une puissance de 45 kW, équipe le tunnel et son régime de fonctionnement peut être modifié à partir d'un logiciel de contrôle. La fréquence des moteurs peut être ajustée entre 0 et 60 hertz, ce qui permet d'avoir des vitesses de vent allant jusqu'à 30 m/s. Le tunnel est également équipé d'un système de réfrigération à

l'ammoniaque. Ce système est relié à un panneau de contrôle, qui permet d'atteindre des températures d'air de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec une précision de $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. En outre, le tunnel est équipé d'un RTD (Décteur de température à l'aide d'une résistance) qui donne à tout moment la température de l'air circulant à l'intérieur. L'ensemble de l'équipement du tunnel se branche à un ordinateur permettant une acquisition de données en temps réel.

La section de mesures se situe dans la chambre en aval du moteur de la soufflerie réfrigérée. Ses dimensions sont de 0,9 mètre de largeur, 0,45 mètre de hauteur et 3,05 mètres de longueur.

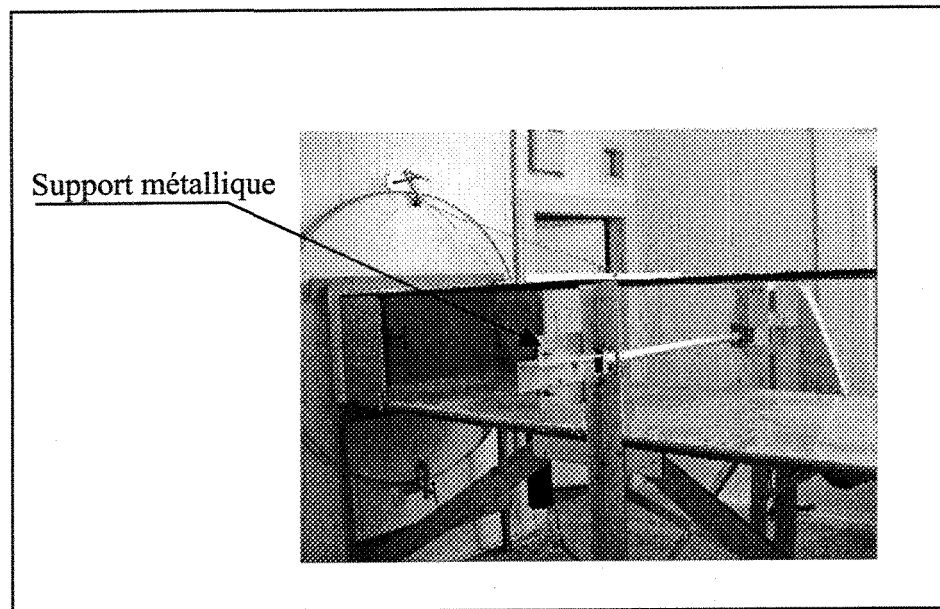


Figure 5.7 : Section des tests dans la chambre du tunnel

La section des tests est une section fermée et amovible de plexiglas avec au centre un dispositif permettant l'installation du cylindre le plus court (0,86 mètre). Le tunnel a été

dimensionné de telle sorte que l'écoulement d'air soit laminaire. Des tests expérimentaux à l'aide d'un générateur de fumée ont permis de le confirmer. Finalement, le tunnel est équipé de thermocouples de type T à différents endroits, ce qui permet de connaître la température de l'air tout au long de l'expérience.

5.3 MESURE DE LA MASSE DE GLACE FONDUE

Lors des expériences sur le délestage de la glace accumulée autour du câble, il faut connaître la masse de glace fondue. Deux capteurs de force furent employés. Elles sont des éléments de pesée fonctionnant sur le principe des jauges de contraintes. Il s'agit d'un système complet où les jauges sont installées et câblées sur un pont de résistances entières. Les capteurs de force présentent l'avantage de mesurer la déformation due à la présence de la glace. Les capteurs sont branchés à un pont de Wheastone. Des mesures au laboratoire ont permis d'obtenir la courbe déformation-masse de la glace (figure 5.8).

Afin de valider les données de la figure (5.8), un réservoir fut utilisé pour ramasser la glace fondue (figure 5.4). Une comparaison entre le résultat des capteurs de force et l'eau ramassée a permis de connaître le pourcentage d'erreur qui est de l'ordre de $\pm 4 \%$. Cette différence est probablement due à l'évaporation des gouttelettes d'eau dans le réservoir.

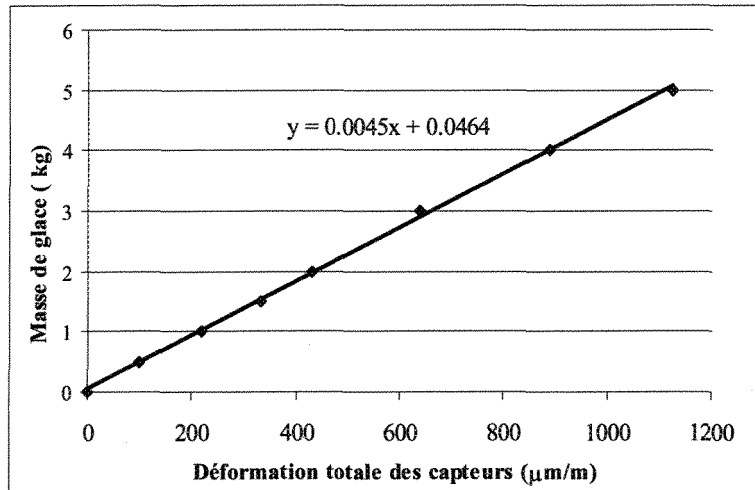


Figure 5.8 : Déformation totale des capteurs de force

Dans le cas du délestage par fonte en présence du vent et du délestage par sublimation, l'utilisation des capteurs de force est difficile. En effet, la vitesse du vent exerce une force aérodynamique sur le dépôt de glace et le capteur se trouve à mesurer la déformation totale due au poids de la glace et de la force exercée par le vent. Finalement, une balance à plateau située à l'intérieur de la chambre du tunnel a été utilisée. L'erreur de lecture de la balance est 5 g par 1 kg soit 0,5 %.

5.4 PROCÉDURES EXPÉRIMENTALES

5.4.1 Phase d'accumulation

Le déroulement des essais se passe en trois étapes expliquées ci-dessous :

La phase de préparation :

- Purger la ligne d'eau,
- préparer le conducteur (0,86 ou 1,8 mètres) afin qu'il soit fixe et bien positionné sur son support,
- s'assurer que les gicleurs ne sont pas obstrués par des saletés,
- mettre les fils chauffants autour des gicleurs,
- vérifier si le réservoir d'eau est plein,
- ajuster le contrôleur de température de la chambre climatique à la température souhaitée,
- Ajuster le panneau de contrôle de la vitesse du vent.

La phase de démarrage :

- Mettre en marche le refroidisseur d'air et attendre que la température de la chambre et la température du conducteur se stabilisent (1 à 2 heures),
- faire le zéro des capteurs de force dans le cas des tests portant sur le délestage en absence du vent,
- alimenter en courant le moteur du câble et ajuster sa vitesse de rotation,
- ouvrir la ligne d'air et ajuster la pression d'air,
- alimenter les gicleurs en eau et ajuster le niveau du débit.

La phase d'accumulation :

- Noter la température de l'air et mesurer le diamètre total du dépôt de glace à différentes positions préalablement définies à chaque 15 minutes,
- vérifier et réajuster le débit de chaque gicleur si nécessaire,
- une fois l'accumulation terminée, une période de stabilisation d'une heure est requise afin que la glace et le câble atteignent une température constante soit -10°C .

5.4.2 Phase de délestage

Délestage en absence du vent : Deux paramètres permettent de caractériser ce type de délestage : la température de l'air et la masse de la glace fondue. L'accumulation de glace fut réalisée sur le câble le plus long (1,8 m) et le délestage accompli dans la même chambre. La phase d'accumulation est terminée une fois que l'épaisseur radiale de la glace atteint le diamètre recherché, soit 10 mm. Dans ce cas, les gicleurs ne sont plus alimentés en eau et le moteur responsable de la rotation du câble et l'air comprimé sont arrêtés. Les deux capteurs de force sont connectées au pont de Wheastone et la porte de la chambre climatique est ouverte afin d'augmenter la température à l'intérieur de la chambre. Lorsque la température de test ($+9^{\circ}\text{C}$) est atteinte, le système de climatisation permet de la maintenir.

Deux thermocouples de type T, préalablement collés à la surface du câble avant la phase l'accumulation, permettent de suivre l'évolution de la température de contact entre le câble

et la glace pendant la phase de pré-fusion. Les deux thermocouples sont placés à une distance de $(1/3)$ à chaque extrémité du câble. Malheureusement, la température de contact câble-glace n'a pas pu être collectée durant la phase d'accumulation en raison de la rotation du câble et des fils des thermocouples. Pendant la phase de pré-fusion, des mesures de température de l'air et celle de contact entre le câble et la glace sont prises à chaque 5 minutes. Lorsque la température entre la glace et le câble se stabilise autour de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, les mesures sont prises à chaque 10 minutes. L'expérience est terminée après 5 heures de délestage.

Délestage en présence du vent : Trois paramètres caractérisent cette phase : l'épaisseur radiale du dépôt de glace, la vitesse du vent et la température de l'air. La procédure d'accumulation ressemble à celle du délestage en absence du vent. La seule différence est la longueur du câble qui est de 0,86 mètre. La phase du délestage s'est déroulée dans le tunnel réfrigéré.

La procédure des essais est la suivante :

- lorsque la période d'accumulation est terminée, maintenir l'accumulation pendant une heure à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- peser à l'aide d'une balance, la glace à l'intérieur de la chambre climatique
- démarrer le tunnel et ajuster sa température à $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- installer l'accumulation sur le support et connecter les thermocouples, une fois que la température à l'intérieur du tunnel s'est stabilisée,
- ajuster la vitesse du vent dans le tunnel,

- peser la glace à chaque 30 minutes,
- l'expérience est terminée après 2 heures de délestage.

Délestage par sublimation : La procédure du délestage par sublimation est la même que celle du délestage par fonte en présence du vent. Par contre, puisqu'il s'agit du délestage par sublimation, la température à l'intérieur du tunnel fut maintenue à -15°C , et la masse de glace pesée à chaque heure. L'expérience est terminée après 5 heures de délestage. De plus, l'humidité dans le tunnel a été mesurée avec un appareil de marque Mannix Modèle LAM 880D, et qui offre une précision de l'ordre de $\pm 4\%$ lorsque la température de l'air dans le tunnel est égale à -10°C .

5.5 QUELQUES PROBLÈMES RENCONTRÉS LORS DE LA PHASE DE DÉLESTAGE

Les tests du délestage par fonte en présence du vent se déroulent dans une section fermée dans la chambre du tunnel et la température du délestage est égale à $+2^{\circ}\text{C}$. Dans la plupart des cas, la chambre elle-même n'est pas à la même température. Le fait que le support du conducteur soit en aluminium et qu'il est situé à l'extérieur de la section d'essai (figure 5.7), faisait fondre la glace accumulée. En effet, un transfert de chaleur par convection entre le support et l'air de la chambre et puis par conduction entre le support et le câble se produisait. La solution adoptée fut donc de placer des sections de Téflon d'une

épaisseur égale à 3.8 cm à chaque extrémité (figure 5.9). Le second problème est celui de l'effet de bout. La discontinuité entre les parois du tunnel et le dépôt de glace permet au vent de gruger la glace aux extrémités du câble. La solution adoptée fut d'envelopper les extrémités du câble avec une feuille de plastique (figure 5.9).

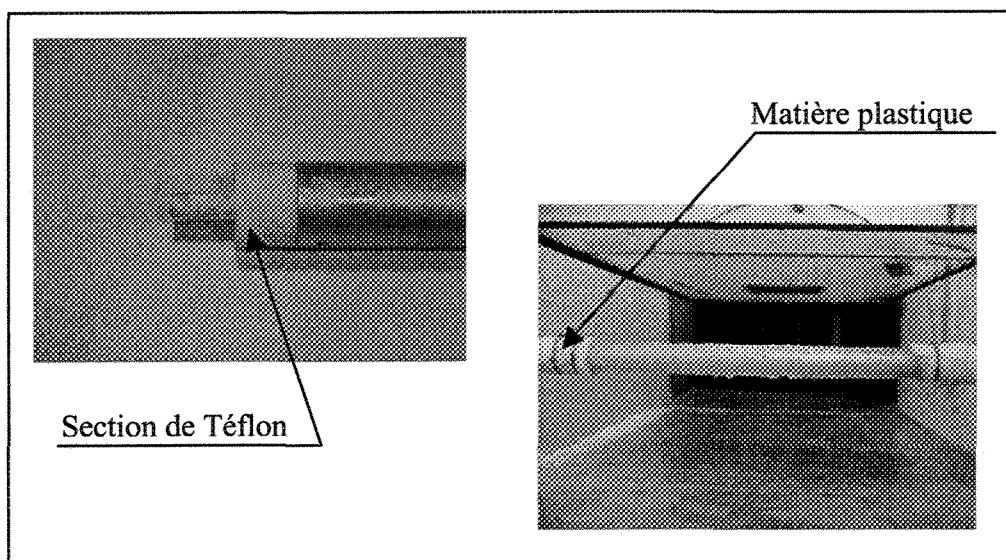


Figure 5.9 : Solutions adoptées pendant la phase du délestage

5.6 CONCLUSION

Le montage expérimental a été conçu dans le but d'obtenir des résultats expérimentaux sur le délestage par fonte et par sublimation. Deux procédures distinctes sont employées dans le cas du délestage par fonte en présence et en absence du vent et dans le cas du délestage par sublimation. En ce qui concerne le délestage en absence du vent, les phases d'accumulation et du délestage sont réalisées dans la même chambre climatique. Le câble

utilisé a une longueur de 1,8 mètres et la glace fondue est pesée grâce à un système de jauges de contraintes. Pour le délestage en présence du vent et le délestage par sublimation, la phase d'accumulation s'est déroulée dans la même chambre climatique alors que la phase de délestage se passe dans le tunnel. Le câble utilisé a une longueur de 0,86 mètre et la glace fondue est pesée sur une balance à palettes.

CHAPITRE 6

LES PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES DE LA PHASE D'ACCUMULATION

Afin de valider les résultats du modèle numérique, des essais expérimentaux en laboratoire furent réalisés sur le délestage par fonte et par sublimation. Étant donné que les installations sont nouvelles, il a été nécessaire de caractériser les paramètres météorologiques de la phase d'accumulation. En effet, c'est à partir de la glace produite durant la phase d'accumulation qu'on peut réaliser des tests sur le délestage. Les expériences en laboratoire ont permis de construire une banque de données sur la phase d'accumulation et sur la phase du délestage par fonte et par sublimation. C'est pourquoi, tout en tenant compte du grand nombre d'essais nécessaires, les mesures du taux du délestage et la forme du dépôt de glace ont toutes été effectuées sur un même type de glace formée dans des conditions identiques le plus possible. Les paramètres météorologiques de la phase d'accumulation n'ont pas été spécifiés ni fixés au départ. Puisque les installations

du laboratoire sont nouvelles, plusieurs tests préliminaires ont été réalisés jusqu'à l'obtention d'une glace homogène et uniforme. Une fois cette étape terminée, les caractéristiques de cette glace ont été mesurées.

La première partie (§6.1) décrira les paramètres météorologiques qui détermineront la quantité et la forme de la glace accumulée durant la phase d'accumulation. Ces paramètres sont la température de l'air durant la phase d'accumulation, la grosseur des gouttelettes, la vitesse du vent, le coefficient de captation et la teneur en eau. La deuxième partie (§6.2) exposera le type de glace produit en laboratoire durant la phase d'accumulation. Cette glace est caractérisée par la forme du dépôt et par la masse volumique.

6.1 PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES PERTINENTS POUR LA FORMATION DU DÉPÔT DE GLACE

6.1.1 Température de l'air

Une température de -10 ± 1 °C a été maintenue dans la chambre froide lors de la formation de la glace durant la phase d'accumulation. Les échantillons de glace formés ont été entreposés durant une nuit à -10 ± 1 °C, dans la même chambre froide, après avoir été enveloppés dans des sacs de plastique pour empêcher la sublimation de la glace.

6.1.2 Vitesse du vent

De par sa conception, le système de ventilation dispose de six sources de vent placés en amont d'un convergent (chapitre 5). Le flux d'air est canalisé à l'aide d'un convergent. À la sortie du convergent des ailettes disposées, horizontalement et verticalement, permettent de régler la direction du flux d'air. À l'aide d'un panneau de contrôle (potentiomètre) qui se trouve à l'extérieur de la chambre froide, on peut varier la vitesse de rotation des moteurs, et ainsi contrôler la vitesse du vent.

Les installations étant nouvelles dans le laboratoire de givrage, il faut tout d'abord étalonner le système de contrôle de la vitesse du vent. Plus exactement, une courbe de variation de la vitesse du vent au niveau de l'échantillon de glace a été établie en fonction de la lecture du potentiomètre. Pour arriver à cela, une série de mesures de la vitesse du vent, à l'aide d'un anémomètre à hélice [modèle : Omega HH-30] a été effectuée en différents points sur le câble et pour différentes lectures du potentiomètre situé sur le panneau de contrôle.

Étant donné que les expériences sont réalisées dans le tunnel réfrigéré et dans la chambre froide, deux longueurs différentes de câble [0,86 m et 1,8 m] sont utilisées. Le câble le plus court correspond à la largeur du tunnel réfrigéré alors que la longueur du câble le plus long a été choisie pour des raisons mécaniques (rigidité en rotation, faible flexion, uniformité de la glace formée, etc.). Par conséquent, la vitesse du vent au niveau des deux câbles a été mesurée.

Afin d'avoir une bonne précision, on remplace le câble par une ficelle tendue entre les deux supports. Pour avoir une meilleure approximation de la vitesse moyenne du vent sur le câble, nous avons choisi de découper la longueur totale de la ficelle en six intervalles sur le câble de 1,8 m long et de quatre intervalles sur le câble de 0,86 m. Ce nombre pair d'intervalles a donné sept points de mesure pour le câble le plus long, et cinq points de mesure pour le câble le plus court. L'étape suivante consiste à fixer une position du potentiomètre et effectuer les mesures de la vitesse du vent à l'aide de l'anémomètre. Ces mesures sont renouvelées pour différentes lectures du potentiomètre.

Dans la chambre froide, lors de la phase d'accumulation, le refroidisseur d'air et le convergent fonctionnent en même temps durant la phase d'accumulation, c'est pourquoi les mesures de la vitesse du vent sont prises dans cette situation. Les premières mesures effectuées sont directement prises devant les hélices. Ces mesures permettront de s'assurer que les hélices produisent un vent de même vitesse. On présente ces données dans le tableau (A6.1) en annexe. Les tableaux (A6.2) et (A6.3) de l'annexe 6 donnent les vitesses du vent en différents points sur les câbles de 1,8 m et 0,86 m respectivement. Ces vitesses sont prises pour la position (7) du potentiomètre. Au cours des expériences en laboratoire, cette position n'a pas été changée. Afin de calculer une valeur moyenne à partir des mesures expérimentale de la vitesse du vent, la méthode de Simpson a été utilisée. Cette méthode permet d'approcher la valeur d'une intégrale. Les valeurs de la vitesse moyenne du vent calculée sont présentées dans le tableau (6.1). En raison de contraintes expérimentales, les deux câbles n'avaient pas la même distance du convergent (source du vent), ce qui explique la différence des valeurs des vitesses du vent.

Longueur du câble	1,80 m	0,86 m
Vitesse du vent	4,9 m/s	2,6 m/s

Tableau 6.1 : Valeurs moyennes des vitesses du vent

Les mesures de la vitesse du vent sont parmi celles qui furent difficiles à obtenir. La chambre froide possède des dimensions assez grandes rendant ainsi l'air turbulent. D'après des tests de fumée (à l'aide d'un générateur de fumée), la vitesse du vent au niveau du câble est turbulente. Cette turbulence est due à la présence du refroidisseur d'air qui se trouve entre le câble et le convergent d'air.

Les mesures de la vitesse du vent ont donné une valeur moyenne qui a été utilisée dans le calcul de la teneur en eau et du coefficient de captation. Il s'agit donc de garder à l'esprit l'influence de la vitesse du vent sur ces paramètres.

6.1.3 Taille des gouttelettes

Le diamètre volumique médian définit la valeur du diamètre des gouttelettes correspondant à 50 % du volume cumulatif de l'ensemble d'un échantillonnage.

Plusieurs méthodes de mesure de la taille des gouttelettes d'eau dans les brouillards naturels ou artificiels ont été développées et Simmons, H.C. (1984) les a classées en deux catégories :

- Les méthodes captatives sont basées sur la captation des gouttelettes par immersion dans l'huile, par impact sur une lamelle ou par solidification des gouttelettes sur un support,
- les méthodes non-captatives sont basées sur la prise des gouttelettes par laser ou par photographie.

La taille des gouttelettes d'eau est déterminée selon une méthode captative appelée la méthode au Collargol [Godard, S. (1960)]. Cette méthode offre de meilleurs résultats que les autres car le pourcentage d'erreur sur la taille des gouttelettes avec la méthode à l'huile est trois fois plus élevé que celui commis avec la méthode au Collargol [Du Nguyen-Dang, (1987)].

La méthode au Collargol est une méthode qui consiste à appliquer une solution de Collargol (96 g de 1,2Dichloroethane et 4 g de Formvar) à 10 % sur une lamelle de verre. Une fois cette solution séchée, la lamelle est placée dans la chambre climatique en face du jet d'eau. L'impact des gouttelettes sur la lamelle laisse une surface de la forme d'un disque brun sur les cotés. D'après les travaux de Godard, S. (1960), la concentration de la solution au Collargol ainsi que la nature du support (nature et dimension du verre de la lamelle) ne modifient pas de manière significative le résultat final de l'expérience. Finalement, la méthode au Collargol est une méthode indirecte, car il faut tenir compte d'un coefficient de correction.

Le diamètre de la gouttelette réelle (d) est lié au diamètre extérieur de l'anneau (D) par la relation suivante : $d = k.D$, où k est un facteur de correction qui vaut $0,34 \pm 0,03$. De

même, Godard, S. (1960) a montré que la valeur de k , établie pour une vitesse d'impact nulle, reste valable et applicable à des vitesses allant jusqu'à 6 m/s.

Si le diamètre de la gouttelette est compris entre 3 et 80 micromètres, la méthode au Collargol est considérée comme bonne. Par contre, si le diamètre dépasse 80 micromètres, le facteur de correction (k) est supérieur à 0,34 et la méthode par immersion doit être utilisée. La méthode par immersion nécessite l'utilisation d'une huile visqueuse ; cela permet de garder les gouttelettes à la surface le plus longtemps possible. Le tableau (6.2) résume les principales méthodes de mesure par impact déjà expérimentées avec leurs facteurs de correction.

Auteurs	Substance de recouvrement	Taille des gouttelettes (μm)	Vitesse m/s	Facteur de correction (k)
Vonnegut, (1946)	Noir de Fumée	2 à 26	45	0,8
May, (1950)	MgO	10 à 200	n.d	0,86
Maruyama, (1954)	MgO	10 à 600	n.d	0,4 à 0,6
Gorard, (1960)	Collargol	15 à 80	0 à 6	$0,34 \pm 0,03$
Jiusto, (1965)	Gélatine	1 à 250	20 à 60	0,5
Garland, (1971)	Gélatine	0,4 à 70	n.d	0,6
Mossop, (1983)	Noir de fumée	1 à 1000	55 à 75	0,2 à 0,56
Du Nguyen-Dang (1987)	Collargol sur verre	49 à 149	4 à 30	$0,33 \pm 0,02$

Tableau 6.2 : Résumé des principales méthodes de mesure par impact

Pour mesurer le diamètre volumique médian des gouttelettes, on place une lamelle de taille 3 cm x 1 cm enduite de Collargol dilué à 10 % dans de l'eau domestique. La lamelle

est orientée de façon à être perpendiculaire au jet des gouttelettes, alors que la durée de l'impact ne doit pas dépasser une à deux secondes. En effet, si la lamelle est exposée au jet pendant une longue période, un phénomène de coagulation des gouttelettes se produit et l'échantillon est inutilisable. Un premier échantillonnage est effectué à l'œil nu, suivi d'un autre avec un microscope. La figure (6.1) montre une image prise par le microscope. Le carré encadre deux gouttelettes superposées. Ce type de gouttelettes ne doit pas être compté lors de l'échantillonnage.

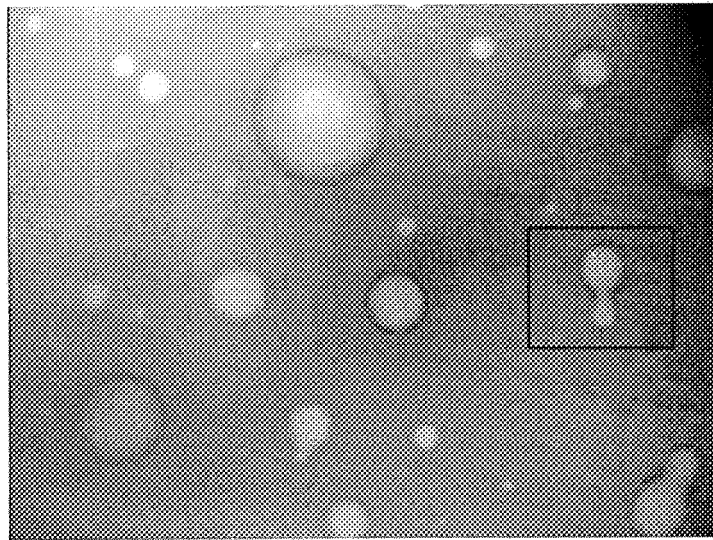


Figure 6.1 : Traces des gouttelettes laissées sur une lamelle

La méthode de mesure de la taille des gouttelettes est la suivante :

- Régler la température et la vitesse du vent dans la chambre froide,
- fixer le débit et la pression d'eau ainsi que la pression d'air des gicleurs,

- orienter le support à lamelle de façon perpendiculaire au jet d'eau, et le placer juste à côté du câble. La lamelle doit être recouverte d'une couche sèche de Collargol. Le support est muni d'un mécanisme qui fait exposer la surface de la lamelle au jet d'eau sur une courte période (une à deux secondes),
- prendre des photos claires des traces laissées par les gouttelettes à l'aide d'un microscope muni d'un micromètre intégré dans l'oculaire. Le modèle utilisé est un Scienscope AVM-1 et le grossissement utilisé est de 150 fois.

Au total, deux relevés du spectre volumique des gouttelettes ont été effectués à deux températures différentes : 20 °C et -10 °C. Chaque relevé est le résultat de lectures sur quatre lamelles au minimum. Ces lamelles sont sélectionnées parmi un lot de dix lamelles, selon la qualité et la clarté de l'impact des gouttelettes. Les lamelles sont exposées à des conditions les plus identiques possible.

Les figures (6.2) et (6.3) montrent la distribution du nombre et du volume des gouttelettes en fonction du diamètre, lorsque la température de l'air dans la chambre froide est de 20 °C et -10 °C. Les mesures qui ont servi à tracer ces deux courbes se trouvent à l'annexe 6 (Tableaux (A6.4) et (A6.5)).

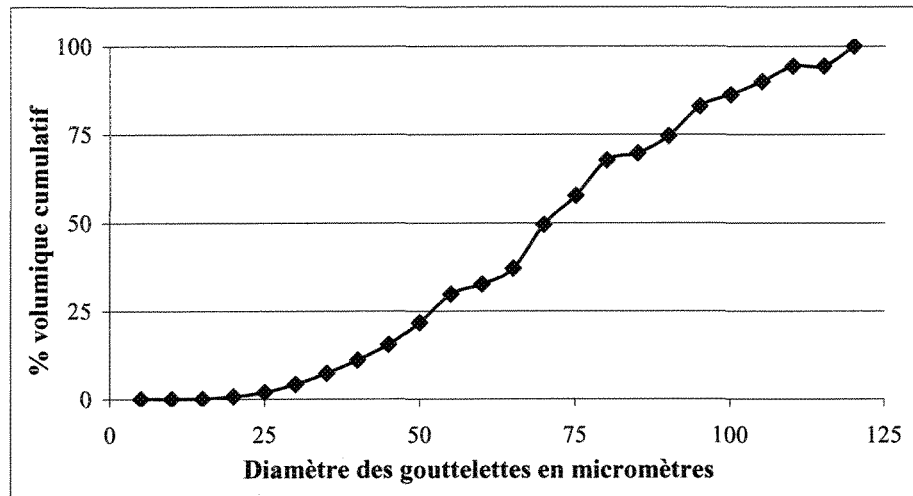


Figure 6.2 : Spectre des gouttelettes à 20°C

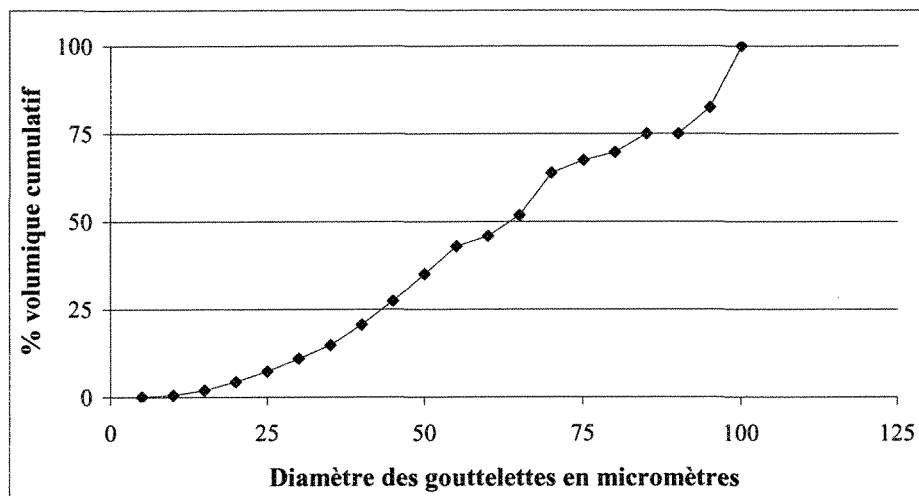


Figure 6.3 : Spectre des gouttelettes à -10°C

Les diamètres volumiques médians des gouttelettes retenus sont de 70μm et 65μm pour des températures de 20 °C et -10 °C respectivement. D'après les séries d'expériences

effectuées dans la chambre froide, le diamètre volumique médian mesuré varie entre 40 et 150 micromètres.

Les sources d'erreurs sur les mesures des gouttelettes peuvent être d'origines diverses : l'erreur statistique ou celle due à l'évaporation des gouttelettes dans l'air sont les plus importantes. Malgré ces sources, la méthode au Collargol reste une des meilleures méthodes de mesure du diamètre des gouttelettes.

6.1.4 Teneur en eau

La teneur en eau définit la quantité d'eau en grammes contenue dans un volume de 1m^3 d'air. La méthode du cylindre rotatif est utilisée pour mesurer cette quantité [Stallabrass, J.R. (1978)]. La teneur en eau est calculée à partir de la masse de glace collectée par le cylindre selon l'équation suivante :

$$w = \frac{\pi \rho}{E V_{air} t} \left[\sqrt{\frac{m_g}{\pi \rho L} + r_i^2} - r_i \right] \quad (6.1)$$

Dans cette relation, w est la teneur en eau, ρ est la masse volumique de la glace, E est le coefficient de captation qui est fonction du rayon initial du cylindre rotatif r_i , V_{air} est la vitesse de l'air, L est la longueur du cylindre rotatif, t est la période d'exposition du cylindre et m_g est la masse de la glace accumulée autour du cylindre.

Le calcul de la teneur en eau fait appel à la valeur moyenne du coefficient de captation E qui est lui-même fonction du diamètre moyen des gouttelettes. Stallabrass, J.R. (1978) propose une valeur de 0,861 lorsque la taille des gouttelettes ne dépasse pas 80 μm et le diamètre du cylindre rotatif est 2,55 mm.

Pour mesurer la teneur en eau, on accumule de la glace sur un cylindre lisse de 2,55 mm de diamètre, tournant à un tour/seconde pendant une période t . Ensuite, on mesure la masse de la glace accumulée. La durée de l'impact doit être comprise entre 30 secondes et une minute. La teneur en eau est calculée selon la relation (6.1). Les valeurs des paramètres qui ont servi au calcul de la teneur en eau sont listées au tableau (A6.7) de l'annexe 6.

Avec les conditions de formation de la glace mentionnées, quatre prélèvements de la masse de la glace sur le cylindre rotatif sont effectués. La moyenne de ces mesures donne une valeur moyenne de 5,56 g/m^3 pour la teneur en eau. Le tableau (A6.6) dans l'annexe 6 donne les valeurs de la masse de la glace accumulée ainsi que les valeurs de la teneur en eau.

La source d'erreur effectuée sur les mesures de la teneur en eau est une erreur de lecture. La balance utilisée pour la mesure de la masse de la glace et du cylindre offre une précision à $\pm 0,1\text{g}$, ce qui correspond à une erreur de 0,5 g/m^3 sur la teneur en eau.

6.2 TYPE DE GLACE PRODUITE EN LABORATOIRE

6.2.1 Masse volumique de la glace

Dans cette étude, cinq manchons de glace ont été formés dans les mêmes conditions atmosphériques. Un contrôle à l'œil nu est fait pour ajuster le débit d'eau de chaque gicleur et les pressions d'eau et d'air. Les paramètres utilisés pour le calcul de la masse volumique de la glace sont donnés au tableau (6.3).

Paramètre	Valeur
Vitesse du vent dans la chambre	4,9 m/s
Température de l'air	-10 °C
Pression d'eau	400 kPa
Pression d'air	100 kPa
Débit d'eau dans chaque gicleur	300 ml/min

Tableau 6.3 : Paramètres utilisés pour le calcul de la masse volumique de la glace

Le principe de la poussée d'Archimède fut utilisé pour déterminer le volume de la glace. Ce principe consiste à mesurer la masse d'un morceau de glace, et d'évaluer son volume à partir de la poussée qui est exercée sur lui lorsqu'il est immergé dans l'huile.

Après avoir taillé un morceau de glace pour mesurer sa masse volumique, celui-ci doit être maintenu par une ficelle très fine. Le morceau de glace suspendu a été trempé dans une solution de Collargol. Ce produit, après séchage, formera une pellicule plastique qui évitera que le morceau de glace soit en contact avec l'huile rouge (So-G-79, lot 870172).

Le contenant d'huile rouge est placé sur une balance et le morceau de glace est immergé dans cette solution. Le poids mesuré par la balance permettra de calculer le volume de la glace. Le tableau (A6.8) de l'annexe 6 donne les mesures trouvées, ainsi que la procédure à suivre pour calculer la masse volumique de la glace. D'après le tableau (6.4) la masse volumique moyenne mesurée est $0,883 \text{ g/cm}^3$. Un écart type est calculé par la méthode statistique de Student (un intervalle de confiance de 95 %) et la valeur est de $0,0253 \text{ g/cm}^3$.

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
Masse volumique (g/cm^3)	0,890	0,896	0,886	0,852	0,892

Tableau 6.4 : Valeurs des masses volumiques mesurées

6.2.2 Forme du manchon de glace

Sur les sites naturels et suivant les conditions météorologiques et la rigidité en torsion du câble, la forme du dépôt de glace sur les câbles varie. Selon le cas, deux formes sont souvent observées : circulaire ou elliptique.

D'une part, et afin de valider les résultats du modèle numérique qui utilise une forme circulaire, les accumulations de glace produites en laboratoire sont circulaires, d'autre part, il est facile de produire ce type de forme puisque la géométrie circulaire est caractérisée par une seule variable : le diamètre.

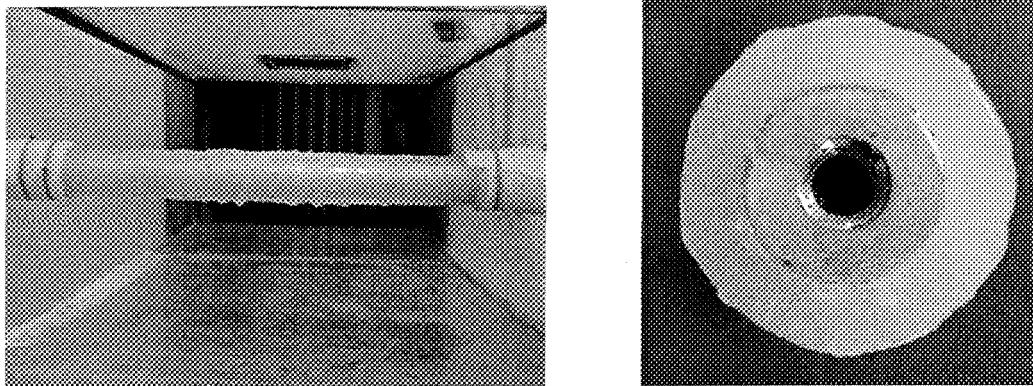


Figure 6.4 : Accumulation cylindrique et sa coupe transversale

Le câble cylindrique utilisé est lisse, sa longueur et son rayon sont respectivement 0,86 m et 0,018 m. La figure (6.4) montre un dépôt cylindrique de glace ainsi que sa coupe transversale. Sur la longueur du cylindre, cinq points équidistants sont marqués. Ces points ont servi de repère pour la mesure de l'épaisseur radiale de la glace.

Pendant la phase d'accumulation on mesure à chaque quinze minutes le diamètre total de l'accumulation sur les cinq points et une moyenne arithmétique est calculée à partir de ces mesures. Au total, trente accumulations ont été effectuées et la moyenne de toutes ces mesures a permis de tracer la variation de l'épaisseur radiale en fonction du temps d'accumulation (figure 6.5).

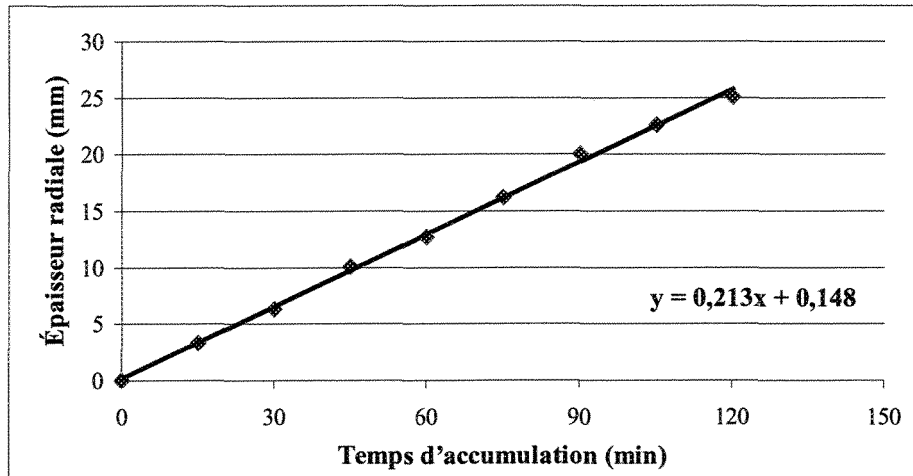


Figure 6.5 : Variation de l'épaisseur radiale de la glace en fonction du temps (câble 0,86 m)

Durant la phase d'accumulation et pour presque tous les manchons de glace, l'épaisseur de la glace est légèrement plus grande autour de la partie centrale du câble qu'aux extrémités. À ces endroits, l'absence de formation de glace est due à la faible vitesse du vent (inférieur à 1,5 m/s). Pour remédier à ce problème, on taille la glace durant sa formation lorsqu'on aperçoit une variation du diamètre de l'accumulation d'un endroit à autre. Cette méthode, nous permet d'obtenir une glace répartie de façon uniforme sur la longueur totale du câble.

Pour avoir une idée de l'uniformité du dépôt de glace, on doit calculer l'épaisseur radiale équivalente à partir de l'équation (6.2). Si le dépôt de glace est parfaitement cylindrique, e est l'épaisseur de glace mesurée.

$$e = \sqrt{\frac{m_g}{\pi \rho L} + r_i^2} - r_i \quad (6.2)$$

Dans cette relation, e est l'épaisseur radiale équivalente, ρ est la masse volumique de la glace, r_i est le rayon initial du cylindre, L est la longueur du cylindre rotatif et m_g la masse de glace. Le tableau (A6.9) de l'annexe 6 donne l'épaisseur radiale et l'épaisseur radiale équivalente pour les trente échantillons de mesure. D'après ce tableau, l'erreur relative entre l'épaisseur radiale et l'épaisseur radiale équivalente est de 5 %.

6.2.3 Coefficient de captation

Le coefficient de captation est le ratio entre la masse de glace accumulée sur le cylindre et la masse totale des gouttelettes dirigées sur la surface de la section du cylindre. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Le coefficient de captation est calculé à partir de l'équation suivante [Makkonen, L. et al (1987)] :

$$E = \frac{m_g}{w \ t \ L \ V_{air} \ D} \quad (6.3)$$

Dans cette relation, E est le coefficient de captation, m_g est la masse de glace mesurée expérimentalement (g), D est le diamètre total (cylindre+glace), V_{air} la vitesse de l'air (4,9 m/s), L est la longueur du dépôt de glace, t est la période d'exposition du cylindre et w est la teneur en eau mesurée expérimentalement (5,56 g/m³). À partir du tableau (A6.9) de l'annexe 6, le coefficient de captation a une valeur moyenne de 0,31.

6.3 CONCLUSION

Les paramètres météorologiques de la phase d'accumulation ont été caractérisés par des mesures en laboratoire. Ces paramètres sont : la température de l'air durant la phase d'accumulation, la grosseur des gouttelettes, la vitesse du vent, le coefficient de captation, la teneur en eau, la masse volumique et la forme du dépôt de glace.

La température de l'air durant la phase d'accumulation est égale à $-10 \pm 1^{\circ}\text{C}$ alors que la grosseur des gouttelettes se situe autour de $65\text{ }\mu\text{m}$. La méthode utilisée pour mesurer la taille des gouttelettes est la méthode au Collargol. Les mesures de la vitesse du vent sont parmi celles qui furent difficiles à obtenir. Les dimensions de la chambre froide sont assez grandes, rendant ainsi l'air turbulent. En effet, selon le câble utilisé, (0,86 ou 1,8 m) la vitesse du vent est différente (2,6 ou 4,9 m/s). Le coefficient de captation a été calculé à partir de l'équation (6.3) et sa valeur est égale à 0,31. La méthode du cylindre rotatif est employée pour mesurer la teneur en eau qui est de l'ordre de $5,56\text{ g/m}^3$. Le principe de la poussée d'Archimède fut utilisé pour déterminer le volume de la glace qui est de l'ordre de $0,883\text{ g/cm}^3$. Finalement la glace produite en laboratoire a une forme cylindrique.

CHAPITRE 7

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET VALIDATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE

Les résultats expérimentaux sur le délestage par fonte et par sublimation, obtenus à l'aide du montage expérimental sont présentés dans ce chapitre. Le montage expérimental ainsi que la procédure des tests furent décrits en détail au chapitre 5. Les tests expérimentaux ont été divisés en trois séries : le délestage par fonte en absence du vent (§7.1), le délestage par fonte en présence du vent (§7.2) et le délestage par sublimation (§7.3). En ce qui concerne le délestage en présence du vent, une combinaison entre deux épaisseurs radiales de glace [(§7.2.1), (§7.2.2) et (§7.2.3)] et trois vitesses de vent a permis d'avoir six cas de délestage. Une comparaison entre les résultats du modèle numérique et ceux de l'expérience a fait le sujet du paragraphe (§7.4). Cette comparaison met en évidence les forces et les limites du modèle numérique.

7.1 DÉLESTAGE PAR FONTE EN ABSENCE DU VENT

Selon la procédure expérimentale déjà expliquée au chapitre 5, plusieurs tests préliminaires ont été effectués avant d'arriver à une glace homogène et répartie de façon uniforme sur la longueur totale du câble. Les paramètres de la phase d'accumulation qui ont servi au délestage par fonte en absence du vent sont listés au tableau (7.1).

	Paramètres d'accumulation
Longueur du câble	1,8 m
Température de l'air	-10 °C
Vitesse du vent	4,9 m/s
Durée totale de l'accumulation	65 min
Épaisseur radiale moyenne de la glace	11,5 mm
Masse totale de la glace	2,6 kg

Tableau 7.1 : Paramètres de la phase d'accumulation (délestage sans vent)

Quatre essais d'accumulation ont permis de tracer la courbe de la figure (7.1). Des mesures de l'épaisseur radiale ont été prises à chaque 15 minutes à l'aide d'un pied à coulisse digital. L'épaisseur radiale moyenne est égale à 11,5 mm après 65 minutes d'accumulation. On remarque à la figure (7.1) que l'épaisseur radiale se trouve une fonction à peu près linéaire du temps.

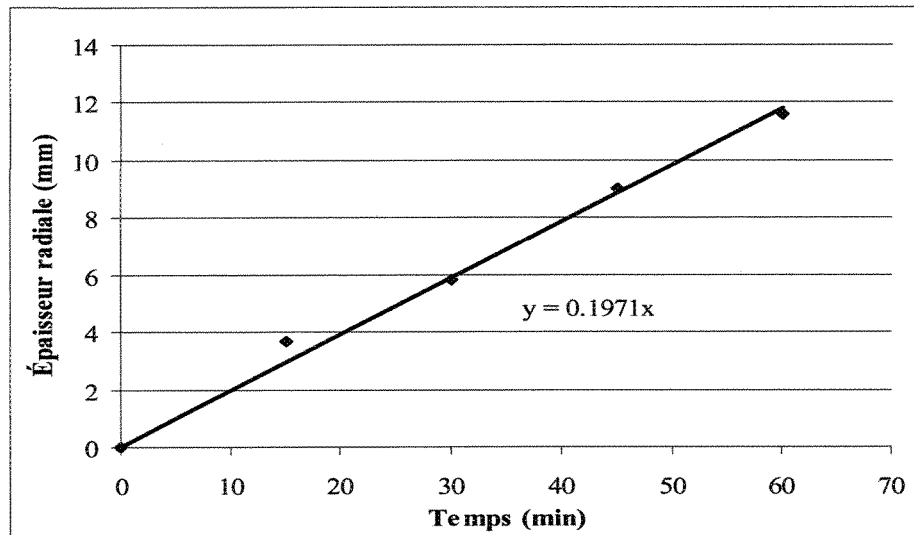


Figure 7.1 : Évolution de l'épaisseur radiale de glace (câble de 1,8 m)

La masse totale de glace accumulée sur la longueur totale du câble est égale à 2,6 kg, la température d'accumulation est -10°C et la vitesse moyenne du vent est égale à 4,9 m/s. La figure (7.2) représente l'évolution de la température de contact entre le câble et la glace en fonction du temps. Cette courbe a été obtenue à l'aide de deux thermocouples de type T, alors que l'erreur de mesure est de l'ordre de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. D'après cette courbe, une durée d'une heure a été nécessaire pour que la température de la glace passe de -10 à 0°C . L'évolution de la température de la glace dépend de celle de la chambre climatique. En ouvrant la porte de la chambre, l'air ambiant entre en contact avec celui de la chambre et un réchauffement se produit. La température de l'air a fluctué entre 8 et 10°C , après une heure et demie de test.

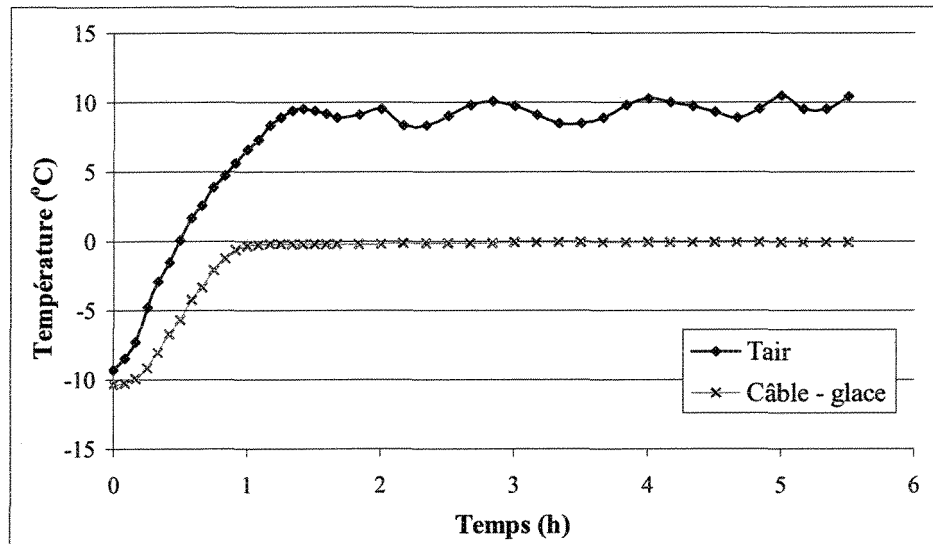


Figure 7.2 : Évolution dans le temps des températures de l'air et de la glace

Durant la phase du délestage, deux capteurs de force ont permis de mesurer la déformation du câble avec le dépôt de glace. Les mesures de ces capteurs ont permis de convertir la déformation en masse de glace (figure 5.8). La figure (7.3) montre la décroissance de la masse totale de la glace en fonction du temps, pendant le délestage en absence du vent. Les données qui ont servi à tracer cette courbe sont présentées en annexe A7.1.

Au cours de cette expérience, la température de l'air égale 9 °C et le pourcentage d'humidité dans l'air est de 60 %. Après 5,7 heures de fonte, la glace a perdu 32 % de sa masse initiale. Ce résultat, obtenu à l'aide de la lecture des capteurs de force, est équivalent à 0,86 kg de glace fondue ou 830 ml d'eau. Par contre, la quantité d'eau récupérée par le réservoir totalise 790 ml. En fin, la quantité de glace fondue est comprise entre celle mesurée à l'aide des capteurs de force, et celle récupérée par le réservoir. Ce qui donne un

pourcentage entre 30 et 32 % de la masse initiale. Le tableau (7.2) résume les résultats de ce type de délestage.

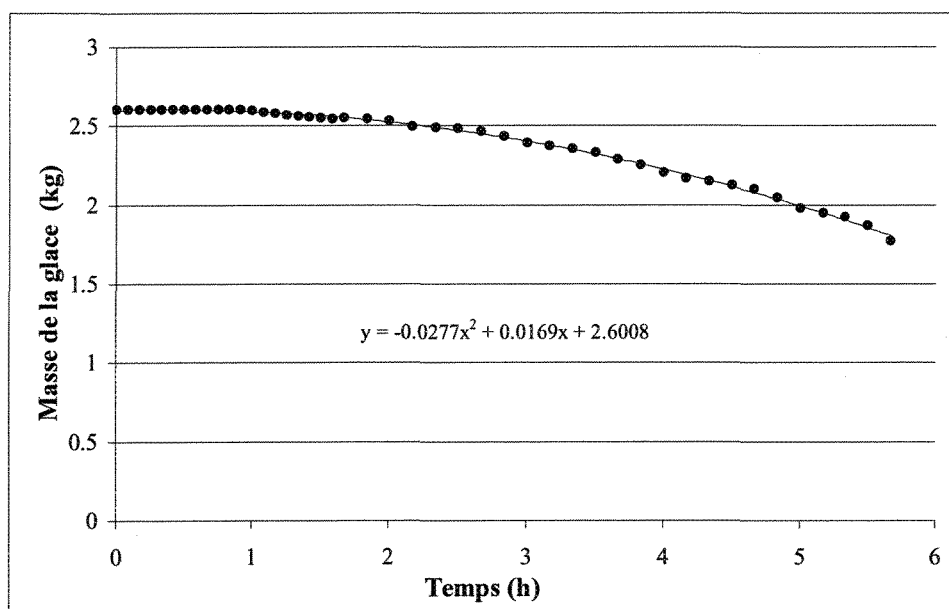


Figure 7.3 : Décroissance de la masse de glace en fonction du temps

	Paramètres du délestage
Température de fonte	9 ± 1 °C
Vitesse du vent:	≈ 0 m/s
% d'humidité	60 %
Durée de la phase de pré-fusion	60 min
Masse finale de la glace (capteurs)	1,77 kg
Volume d'eau récupérée	790 ml
% de glace fondu	30 à 32 %
Durée totale de l'expérience	5,7 h

Tableau 7.2 : Caractéristiques de la phase de délestage ($V_{\text{air}} = 0$ m/s)

Afin de calculer la durée de la phase de pré-fusion, la courbe de la figure (7.3) fut utilisée. En effet, une ligne tangente à la courbe du délestage a été tracée en parallèle à l'axe des abscisses. Au moment où la courbe de délestage dévie de la tangente horizontale, la phase de pré-fusion est terminée. D'après la courbe de la figure (7.3), la phase de pré-fusion dure 60 minutes.

Par contre, on dit que le régime de fonte est établi, lorsque le gradient de température du dépôt de glace est nul. D'après le tableau (A7.1) en annexe, le régime de fonte est établi après 70 minutes.

La vitesse de fonte se calcule à partir de l'équation (7.1) et des données du tableau (A7.1) en annexe. En supposant que la surface initiale du dépôt de glace est cylindrique, la valeur calculée est : $V_{\text{fonte}} = 0,532 \text{ kg/m}^2\text{h}$.

$$V_{\text{fonte}} = \frac{\text{Masse de la glace fondue}}{\text{Surface du dépôt de glace initiale} \times \text{Durée du test}} \quad (7.1)$$

7.2 DÉLESTAGE PAR FONTE EN PRÉSENCE DU VENT

La procédure expérimentale de la phase de délestage en présence du vent fut expliquée au chapitre 5. Afin d'arriver à une glace homogène et répartie de façon uniforme sur la longueur totale du câble (0,86 m), trois tests préliminaires eurent lieu. En comparant le nombre de ces tests pour les deux câbles (3 et 24 tests), on remarque qu'il est plus facile de contrôler l'épaisseur et le type de glace accumulés sur le câble de 0,86 mètre de longueur.

Deux épaisseurs radiales de glace sont prévues dans le cas du délestage par fonte en présence du vent, soit 10 et 25 mm. Les paramètres des phases d'accumulation sont donnés aux tableaux (7.3) et (7.4).

	Paramètres d'accumulation
Longueur du câble	0,86 m
Température de l'air	-10 °C
Vitesse du vent	2,6 m/s
Durée totale	40 à 45 min
Épaisseur radiale moyenne de la glace	10,5 mm
Masse totale de la glace	1200 à 1210 g

Tableau 7.3 : Paramètres de la phase d'accumulation ($\epsilon = 10$ mm)

	Paramètres d'accumulation
Longueur du câble	0,86 m
Température de l'air	-10 °C
Vitesse du vent	2,6 m/s
Durée totale	110 à 120 min
Épaisseur radiale moyenne de la glace	25 mm
Masse totale de la glace	3475 à 3536 g

Tableau 7.4 : Paramètres de la phase d'accumulation ($\epsilon = 25$ mm)

L'épaisseur radiale moyenne est égale à 10 mm après 45 minutes d'accumulation, alors qu'il faut entre 110 et 120 minutes pour avoir une épaisseur de 25 mm. L'équation (7.2)

donne la relation qui existe entre l'épaisseur radiale en mm et le temps d'accumulation en minutes (chapitre 6, figure 6.5) :

$$\varepsilon = 0,213t - 0,147 \quad (7.2)$$

Afin d'effectuer le délestage par fonte à des vitesses élevées, le tunnel réfrigéré a été utilisé. On prévoit trois vitesses de vent pour les expériences sur le délestage par fonte en présence du vent : 10, 20 et 30 m/s. Par contre, la période de fonte est toujours égale à deux heures. Les trois vitesses du vent, 10, 20 et 30 m/s, ont été choisies dans des buts bien précis. La vitesse 30 m/s (équivalent à 108 km/h) correspond à un vent très élevé et donc constitue une limite maximale pour les tests sur le délestage par fonte en présence de vent. L'intervalle de 10 m/s entre les trois vitesses permet de faire une régression linéaire si on désire calculer le taux de fonte pour une vitesse qui se situe entre les deux intervalles [10, 20 m/s] et [20, 30 m/s]. Finalement, lorsque la vitesse du vent est inférieure à 10 m/s, les expériences sur le délestage par fonte en absence du vent ($V_{\text{air}} = 0$ m/s) permettent d'avoir une barre inférieure soit l'intervalle [0, 10 m/s]. Le tableau (7.5) donne la fréquence correspond à chaque vitesse de vent dans le tunnel.

Vitesse du vent dans le tunnel	Fréquence correspondante
10 m/s	22 Hz
20 m/s	42 Hz
30 m/s	58 Hz

Tableau 7.5 : Vitesses du vent et fréquences correspondantes

7.2.1 Cas $\varepsilon = 10$ mm

Durant la phase de délestage, la masse de la glace a été mesurée à chaque 30 minutes. Les données qui ont permis d'avoir la courbe de la figure (7.4) ainsi que le tableau (7.6) sont la moyenne de trois tests pour chaque vitesse du vent. La température de l'air dans le tunnel se situe à 2 °C et l'écart type calculé est de 0,4 °C. Dans le tableau (7.6) la vitesse de fonte fut déterminée selon l'équation (7.1). Puisque les courbes de la figure (7.4) sont presque linéaires, on dit que le régime de fonte est établi (chapitre 4, équation 4.7).

$\varepsilon = 10$ mm	Masse initiale avant le délestage	Masse finale après 2 heures	Pourcentage de glace fondue	Vitesse de fonte
10 m/s	1446 \pm 5 g/m	1072 g/m	26 %	1,24 kg/m ² h
20 m/s	1454 \pm 5 g/m	671 g/m	54 %	2,59 kg/m ² h
30 m/s	1442 \pm 5 g/m	219 g/m	85 %	4,04 kg/m ² h

Tableau 7.6 : Résultats du délestage par fonte après 2 heures ($\varepsilon = 10$ mm)

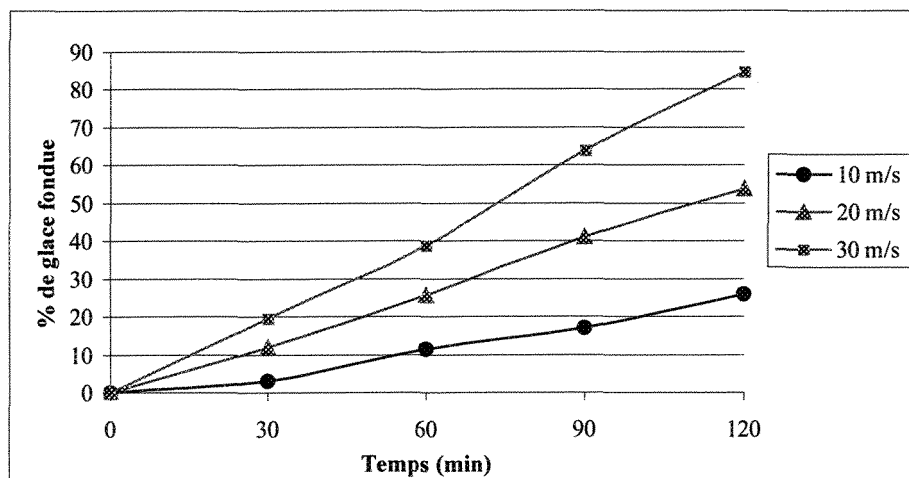


Figure 7.4 : Évolution du % de glace fondue ($\varepsilon = 10$ mm)

La figure (7.5) montre des coupes transversales de la glace après deux heures de fonte à différentes vitesses du vent. Les conditions de formation des manchons de glace sont les mêmes ainsi que la procédure de délestage. Dans cette figure, la flèche indique la direction du vent.

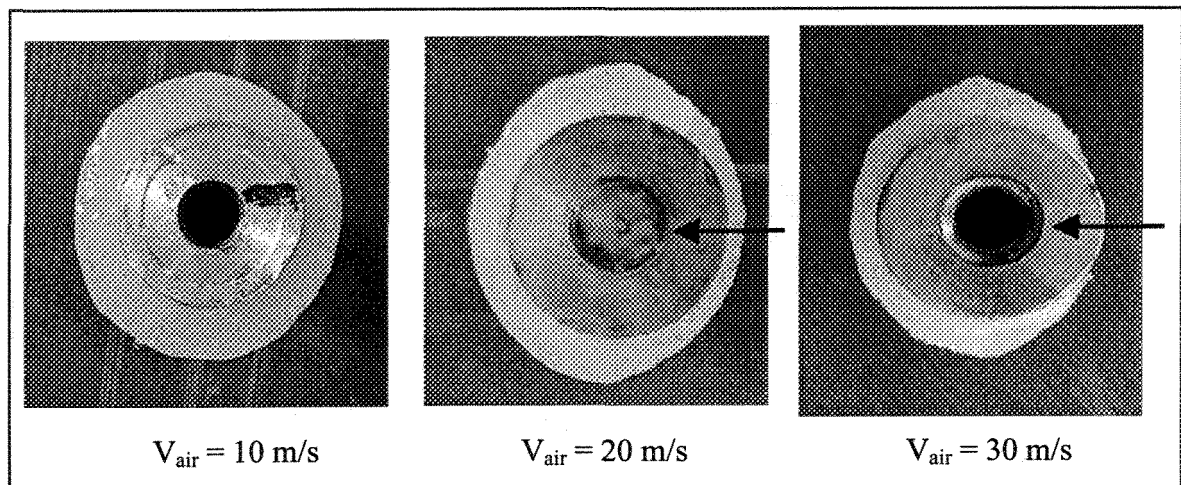


Figure 7.5 : Formes des manchons de glace après 2 heures de fonte ($\varepsilon = 10 \text{ mm}$)

7.2.2 Cas $\varepsilon = 25 \text{ mm}$

Comme dans le cas où l'épaisseur radiale est égale à 10 mm, la masse de glace fut mesurée à chaque 30 minutes et les résultats obtenus ont permis de tracer les courbes de la figure (7.6), ainsi que le contenu du tableau (7.7). De même, la figure (7.7) représente des coupes transversales de la glace après deux heures de fonte et pour trois vitesses de vent.

$\varepsilon = 25$ mm	Masses initiale avant le délestage	Masses finale après 2 heures	Pourcentage de glace fondue	Vitesse de fonte
10 m/s	4265 ± 5 g/m	3554 g/m	17 %	$1,53 \text{ kg/m}^2\text{h}$
20 m/s	4187 ± 5 g/m	2669 g/m	36 %	$3,27 \text{ kg/m}^2\text{h}$
30 m/s	4187 ± 5 g/m	2167 g/m	48 %	$4,35 \text{ kg/m}^2\text{h}$

Tableau 7.7 : Résultats du délestage pour une épaisseur radiale de glace de 25 mm

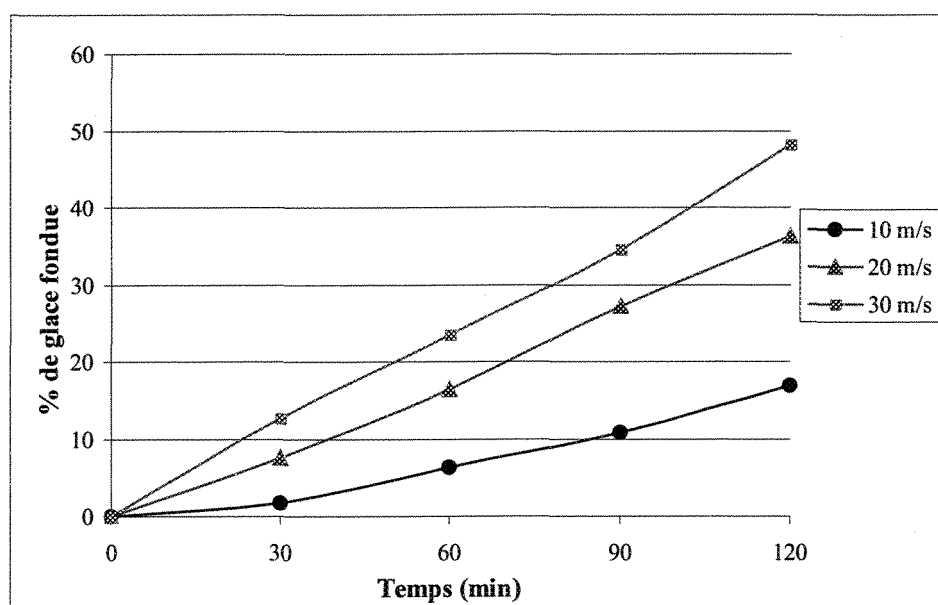


Figure 7.6 : Évolution du % de glace fondue ($\varepsilon = 25$ mm)

La figure (7.8) regroupe les résultats obtenus lors des phases de délestage par fonte en présence du vent. Elle montre également l'existence d'une relation linéaire entre la vitesse du vent et celle de la fonte.

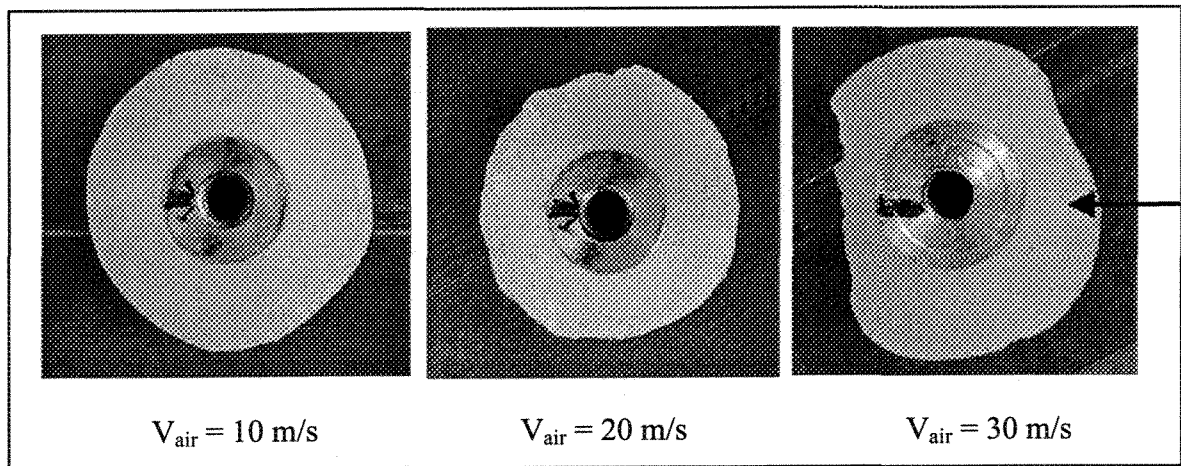


Figure 7.7 : Formes des manchons de glace après 2 heures de fonte ($\varepsilon = 25 \text{ mm}$)

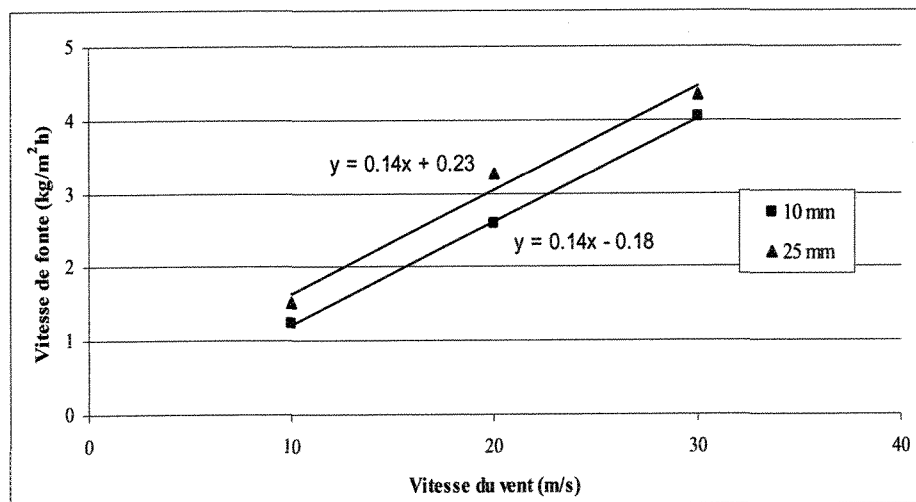


Figure 7.8 : Relation entre la vitesse de fonte et la vitesse du vent ($T_{\text{air}} = 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

7.2.3 Discussion

Contrairement aux tests effectués sur l'épaisseur radiale de 10 mm, les tests réalisés sur l'épaisseur 25 mm ont été difficiles à obtenir. Premièrement, la période d'accumulation fut longue (110 à 120 minutes). Cela rend presque impossible l'obtention d'une glace homogène et répartie de façon uniforme, avec le même ordre de grandeur de l'épaisseur radiale. Deuxièmement, la surface de la glace était rugueuse, par conséquent le coefficient du transfert de chaleur par convection (h) devient très variable et donc différent de celui utilisé dans le modèle numérique. Troisièmement, la quantité de glace fondue et la forme du dépôt dépendent directement du flux de chaleur absorbé donc de la vitesse du vent. En effet, la combinaison de la vitesse de vent et la rugosité de la glace donne des formes de glace aléatoires. La figure (7.9) montre deux photos de glace fondue, lorsque l'épaisseur radiale initiale de la glace est 25 mm, la vitesse de vent est 30 m/s et la température de l'air est 2 °C.

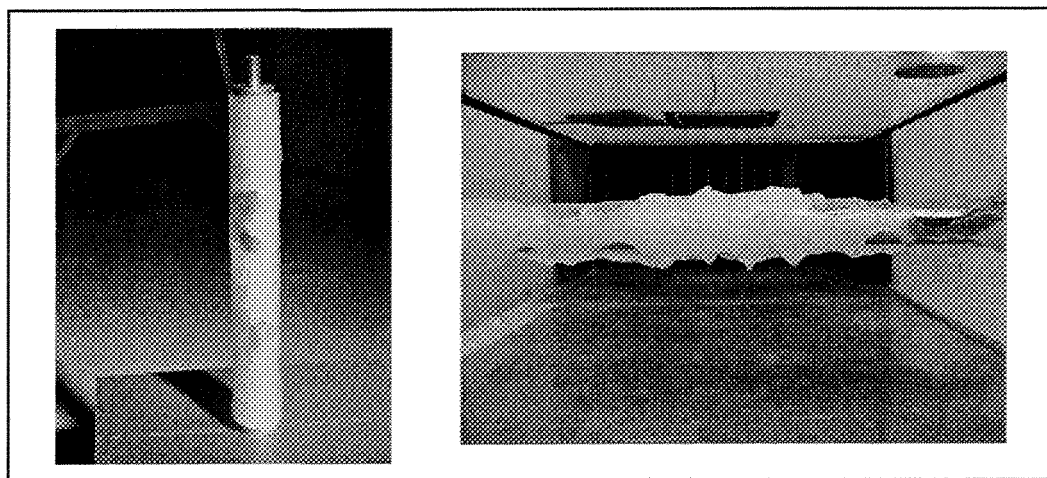


Figure 7.9 : Autres formes de glace obtenues après 2 heures de fonte ($\varepsilon = 25$ mm)

7.3 DÉLESTAGE PAR SUBLIMATION

Des expériences de sublimation de la glace furent tentées dans le tunnel. La procédure est la même que celle formulée pour le délestage par fonte en présence du vent. La seule différence se résume à la température de l'air qui se situe à $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ avec un écart type de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Une seule vitesse de vent fut expérimentée, soit 30 m/s .

À cause du faible pourcentage de sublimation, les mesures du poids de la glace ont été prises à chaque heure, sur une période de cinq heures. Le tableau (7.8) représente les paramètres des tests portant sur la sublimation. Puisque la sublimation dépend fortement de l'humidité, ce paramètre fut également mesuré. Une moyenne de trois tests a été utilisée pour tracer la courbe de la figure (7.10). Cette figure représente l'évolution dans le temps du pourcentage de glace sublimée.

	Paramètres de la sublimation
Longueur du câble	0,86 m
Température de l'air	$-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\sigma = 0,5$)
Vitesse du vent	30 m/s
Humidité	40 à 60 %
Épaisseur radiale moyenne de la glace	10 mm
Masse initiale	1185 g
Masse finale après 5 heures	1142 g
Pourcentage de glace sublimée	3,5 %
Vitesse de sublimation	$57\text{ g/m}^2\text{h}$

Tableau 7.8 : Paramètres des tests de la sublimation

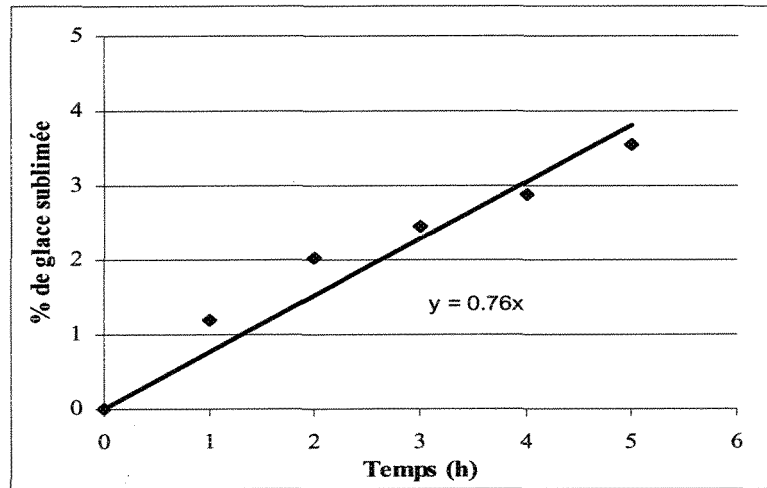


Figure 7.10 : Évolution du % de la glace sublimée

Une coupe transversale de la glace se fit après cinq heures de sublimation. Toutefois, aucune modification de la forme de la glace n'a été remarquée à l'œil nu. Cependant, deux observations ont été faites sur ce type de délestage : premièrement, la glace avait certaines fractures et cassures à l'intérieur du dépôt, deuxièmement, la glace a durci et elle a adhéré solidement. Il a été même très difficile de la casser avec un marteau.

7.4 VALIDATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE

Le montage expérimental a été conçu dans le but de valider les résultats du modèle numérique. Les tableaux (7.9) et (7.10) représentent une comparaison entre les résultats des pourcentages de glace fondue obtenus par le modèle numérique et ceux des expériences

en laboratoire. L'écart calculé représente la différence entre le résultat obtenu expérimentalement et théoriquement. Cette différence se situe entre -4,4 % et 13 %.

$\varepsilon = 10 \text{ mm}$	Expérimental	Théorique	Écart
10 m/s	26 %	30,4 %	-4,4 %
20 m/s	54 %	49,6 %	4,4 %
30 m/s	83 %	70 %	13 %

Tableau 7.9 : Comparaison des résultats numériques et expérimentaux ($\varepsilon = 10 \text{ mm}$)

$\varepsilon = 25 \text{ mm}$	Expérimental	Théorique	Écart
10 m/s	17 %	13,2 %	3,8 %
20 m/s	36 %	29,3 %	6,7 %
30 m/s	48 %	38,8 %	9,2 %

Tableau 7.10 : Comparaison des résultats numériques et expérimentaux ($\varepsilon = 25 \text{ mm}$)

Les figures (7.11) à (7.22) représentent une comparaison des formes de glace obtenues numériquement et expérimentalement après deux heures de fonte à 2 °C à différentes vitesses de vent. La forme de glace est donnée pour les deux épaisseurs radiales de glace soit 10 et 25 mm et les trois vitesses de vent (10, 20 et 30 m/s).

D'après ces figures, on remarque que les formes géométriques obtenues par le modèle numérique correspondant aux vitesses du vent les moins élevées (10 et 20 m/s) sont similaires. Par contre lorsque la vitesse du vent est élevée (30 m/s) et l'épaisseur radiale est

considérable (25 mm), le modèle numérique n'est pas capable de prédire la forme du manchon de glace (figure (20) et figure (22)). En effet, la majorité des formes obtenues avaient des géométries aléatoires (figure 7.9).

Cette divergence des résultats numériques constitue une conséquence directe de l'influence du coefficient de transfert de chaleur par convection utilisé dans les calculs numériques (chapitre 2). Les valeurs des coefficients de transfert de chaleur locaux utilisées sont celles d'un cylindre lisse et non rugueux. Malheureusement, la littérature ne dispose pas de données liées à la variation du coefficient de transfert de chaleur local autour d'un cylindre rugueux.

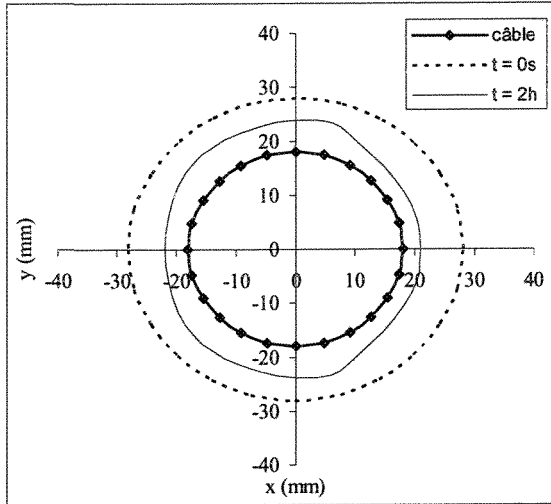


Figure 7.11 : Forme de glace obtenue numériquement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 30 \text{ m/s}$, $T_{\text{air}} = 2^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 10 \text{ mm}$)

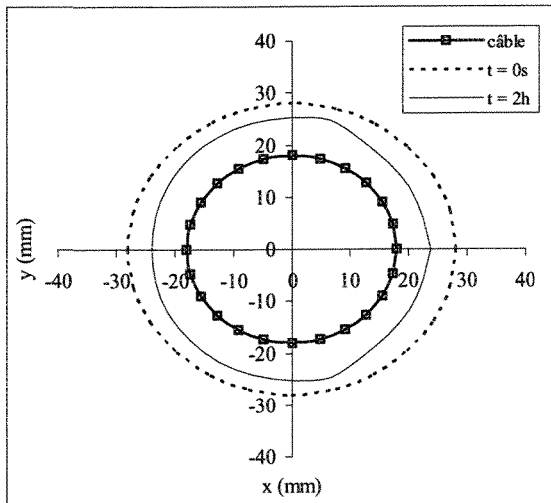


Figure 7.12: Forme de glace obtenue numériquement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 20 \text{ m/s}$, $T_{\text{air}} = 2^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 10 \text{ mm}$)

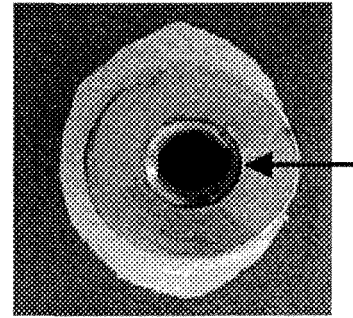


Figure 7.13: Forme de glace obtenue expérimentalement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 30 \text{ m/s}$, $T_{\text{air}} = 2^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 10 \text{ mm}$)

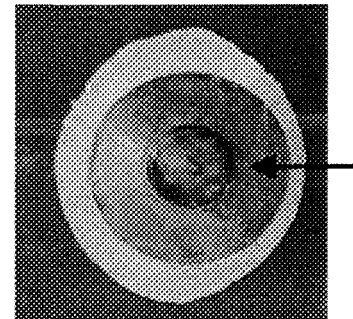


Figure 7.14 : Forme de glace obtenue expérimentalement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 20 \text{ m/s}$, $T_{\text{air}} = 2^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 10 \text{ mm}$)

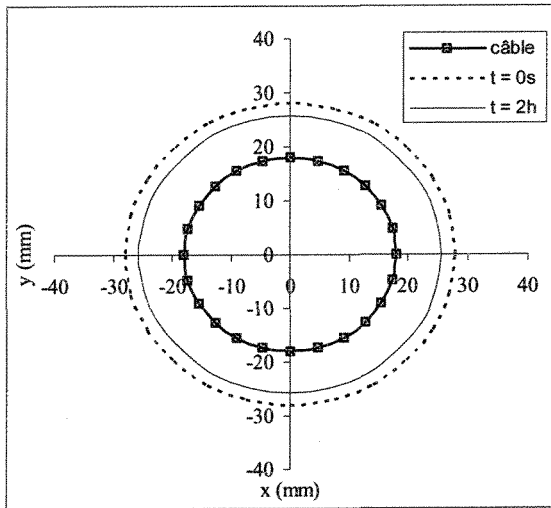


Figure 7.15: Forme de glace obtenue numériquement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 10 \text{ m/s}$, $T_{\text{air}} = 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 10 \text{ mm}$)

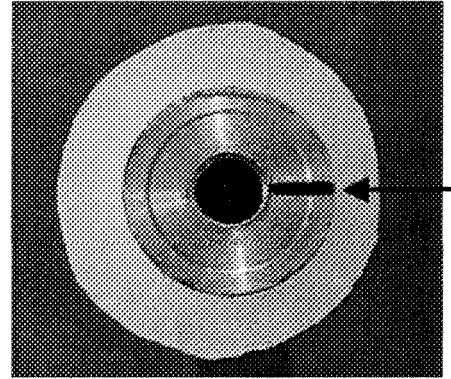


Figure 7.17: Forme de glace obtenue expérimentalement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 10 \text{ m/s}$, $T_{\text{air}} = 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 10 \text{ mm}$)

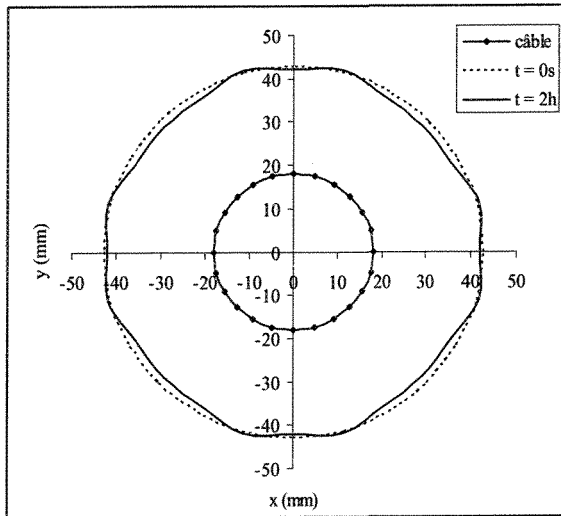


Figure 7.16 : Forme de glace obtenue numériquement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 10 \text{ m/s}$, $T_{\text{air}} = 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 25 \text{ mm}$)

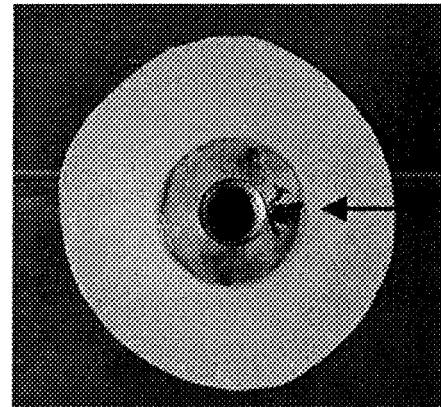


Figure 7.18 : Forme de glace obtenue numériquement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 10 \text{ m/s}$, $T_{\text{air}} = 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 25 \text{ mm}$)

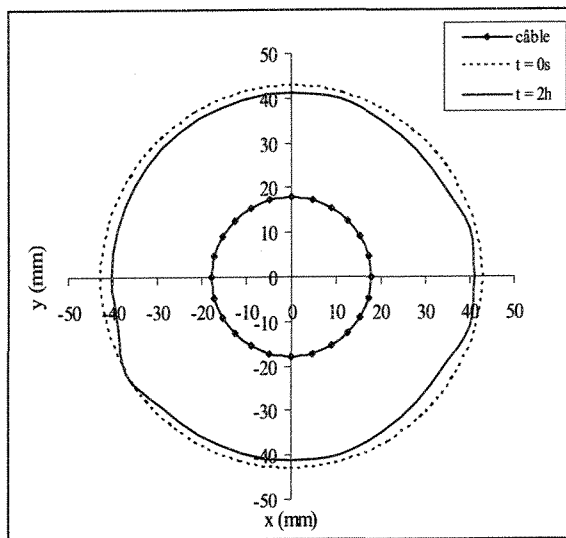


Figure 7.19 : Forme de glace obtenue numériquement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 20 \text{ m/s}$, $T_{\text{air}} = 2^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 25 \text{ mm}$)

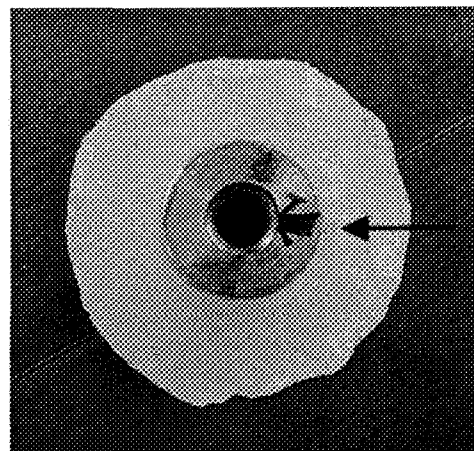


Figure 7.21 : Forme de glace obtenue expérimentalement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 20 \text{ m/s}$, $T_{\text{air}} = 2^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 25 \text{ mm}$)

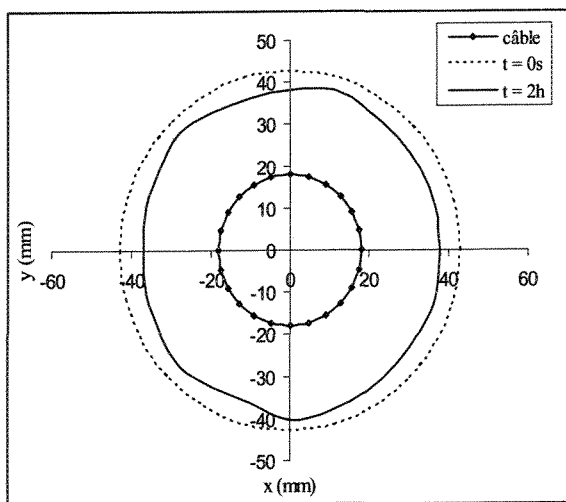


Figure 7.20 : Forme de glace obtenue numériquement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 30 \text{ m/s}$, $T_{\text{air}} = 2^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 25 \text{ mm}$)

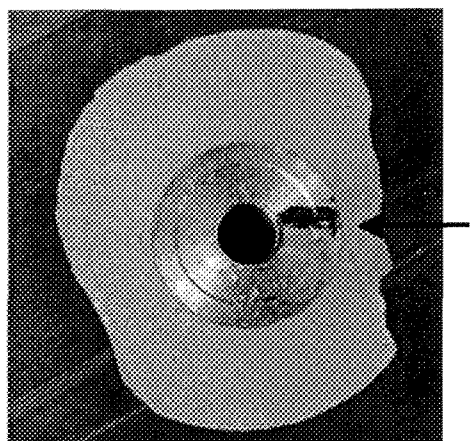


Figure 7.22 : Forme de glace obtenue expérimentalement après 2 heures ($V_{\text{air}} = 30 \text{ m/s}$, $T_{\text{air}} = 2^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 25 \text{ mm}$)

7.5 CONCLUSION

D'après l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus, il s'avère que la procédure et l'appareillage du montage expérimental sont appropriés pour déterminer le pourcentage de la glace fondue, ainsi que la forme du manchon de glace. Une comparaison entre les quantités de glace fondue calculées et mesurées expérimentalement a permis de constater que le modèle numérique donne des résultats semblables, lorsque la vitesse du vent est faible ou moyenne (10 et 20 m/s). Par contre, le modèle numérique n'est pas capable de prédire la forme du manchon de glace lorsque l'épaisseur radiale et la vitesse du vent sont égales à 25 mm et 30 m/s respectivement.

Une seule série de tests (10 mm et 30 m/s) concernant le délestage par sublimation fut réalisée. La température de sublimation était de -15 °C et la quantité de glace sublimée était très faible : 3,5 % de la masse totale sur 5 heures.

CHAPITRE 8

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

8.1 CONCLUSIONS

Un modèle mathématique, à deux dimensions, basé sur la méthode des éléments finis de frontière a été développé dans le but de prédire le taux du délestage par fonte naturelle ainsi que la forme du manchon de glace délesté sous des conditions météorologiques bien définies comme la vitesse du vent et la température de l'air. De même, un montage expérimental a été conçu dans le but d'accumuler et de délester de vrais échantillons de glace atmosphérique. Les expériences en laboratoire ont permis de valider les résultats du modèle numérique.

Les principales conclusions de la partie numérique sont :

1. D'après l'ensemble des résultats numériques obtenus, il s'avère que la méthode des éléments finis de frontière se prête bien à l'étude du problème de changement de phase de la glace. Quoiqu'elle nécessite l'utilisation de la fonction de Green et du calcul intégral, elle demeure tout de même accessible par la programmation. Cette méthode présente également l'avantage de réduire d'un la dimension géométrique du domaine d'étude.
2. L'ensemble des hypothèses de départ a permis de simplifier le modèle mathématique ainsi que le calcul numérique tout en donnant des résultats semblables à l'expérience dans le cas où la vitesse de vent est faible ou moyenne (10 à 20 m/s). Par contre, le modèle mathématique n'est pas capable de prédire la forme du dépôt de glace lorsque l'épaisseur radiale de la glace et la vitesse du vent sont élevées (25 mm, 30 m/s). Cela vient du fait que le coefficient de convection dépend fortement de la forme et de la rugosité de la glace.
3. L'hypothèse que toute la glace fondue est enlevée immédiatement de la surface du dépôt est valable car les expériences dans le tunnel le confirment. Donc, il n'est pas nécessaire de tenir compte du transfert de chaleur dans la mince couche d'eau qui entoure la glace fondue.

Les principales conclusions de la partie expérimentale sont :

1. La procédure et l'appareillage du montage expérimental sont appropriés pour déterminer le pourcentage de la glace fondue ainsi que la forme du manchon de glace.
2. La qualité des résultats numériques obtenus pour la fonte du dépôt circulaire de glace lorsque la vitesse du vent ne dépasse pas 20 m/s et pour les deux valeurs de l'épaisseur radiale de glace est comparable avec ceux obtenus par le modèle expérimental.
3. Lorsque la température de l'air et la vitesse du vent sont constantes, la variation de la quantité de glace fondue en fonction du temps est une courbe linéaire. Les expériences en laboratoire ont permis également de calculer des vitesses de fonte.
4. Les tests expérimentaux effectués sur le délestage en absence du vent, ont permis de constater que la période de pré-fusion est longue comparée avec celle en présence du vent. De même, la quantité de glace délestée dépend directement de la température de l'air et dix fois plus élevée que celle du délestage par sublimation.
5. Les tests expérimentaux effectués sur la sublimation dans le tunnel réfrigéré montrent que le taux de sublimation est faible. Par contre, une seule série de tests a

été effectuée lorsque l'épaisseur radiale de glace est égale à 10 mm et la vitesse du vent est de l'ordre de 30 m/s, dans ce cas, le taux de sublimation est de l'ordre de 57 g/m²h. Ce pendant, puisque la sublimation dépend fortement du pourcentage d'humidité dans l'air, le nombre restreint de cas étudiés ne permet pas de tirer de conclusion finale à propos du délestage par sublimation.

8.2 RECOMMANDATIONS

Dans un premier temps, il serait nécessaire d'introduire dans le modèle numérique le terme du flux de chaleur par effet Joule pour tenir compte de la fonte de glace dans un câble énergisé. Ce type de fonte est directement influencé par la quantité du courant électrique qui circule dans le câble. Le modèle mathématique sur le délestage par fonte sera donc global car il inclura l'effet du vent, la température de l'air, l'épaisseur de glace et le courant électrique. Parallèlement, des expériences en laboratoire devront être menées afin de valider les résultats obtenus. De même, l'utilisation d'un plus grand ou plus petit diamètre du câble permettrait de connaître l'influence de ce paramètre sur la quantité de glace fondue.

Pour mettre en évidence l'influence de la rugosité de la glace sur le pourcentage de glace fondue, il serait important de tenir compte de ce paramètre lors des simulations numériques.

Des essais expérimentaux pourraient être effectués sur de la glace atmosphérique obtenue sous différentes conditions de formation. Les résultats de ces essais seraient utiles pour évaluer plus particulièrement l'influence de la densité de la glace sur le taux de fonte.

Des essais pourraient être réalisés sur le délestage par sublimation à basses vitesses de vent. Par contre, il serait nécessaire de contrôler et de mesurer le pourcentage d'humidité dans le tunnel.

Lors du montage expérimental, il a été possible d'accumuler de la glace pour obtenir une forme circulaire. Il serait intéressant de réaliser des accumulations de formes elliptiques et d'effectuer des délestages par fonte. Dans ce cas, la direction du vent devient un paramètre important à considérer.

Finalement, il serait important d'effectuer une étude sur le délestage par bris mécanique et de construire un modèle mathématique simple dans un premier lieu car ce type de délestage dépend de la température de l'air, des charges statiques et dynamiques et de la structure rhéologique de la glace.

ANNEXES

ANNEXE DU CHAPITRE 4

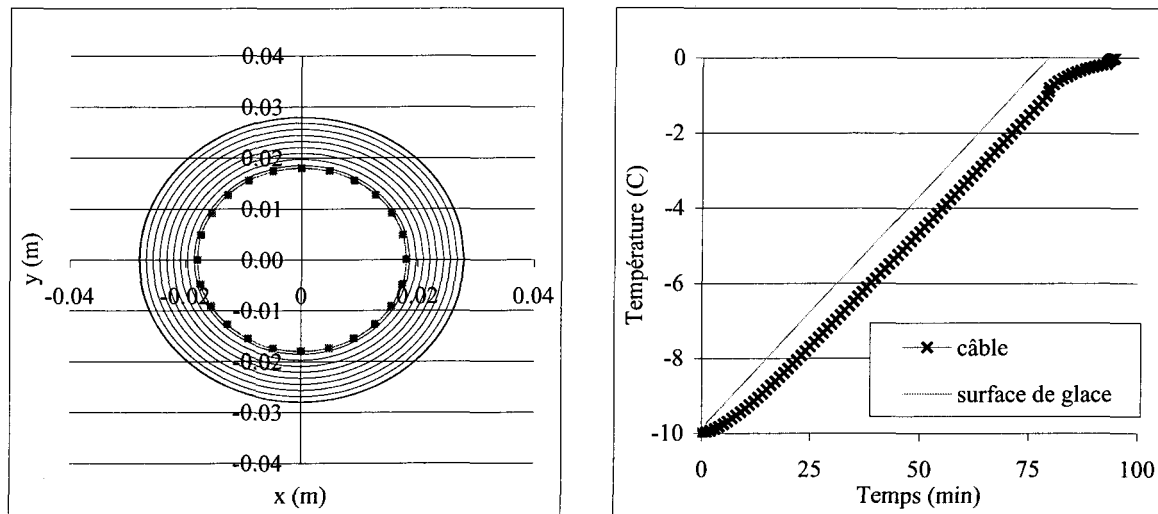


Figure A4.1 : $\varepsilon = 10 \text{ mm}$, $q = 50 \text{ W/m}^2$

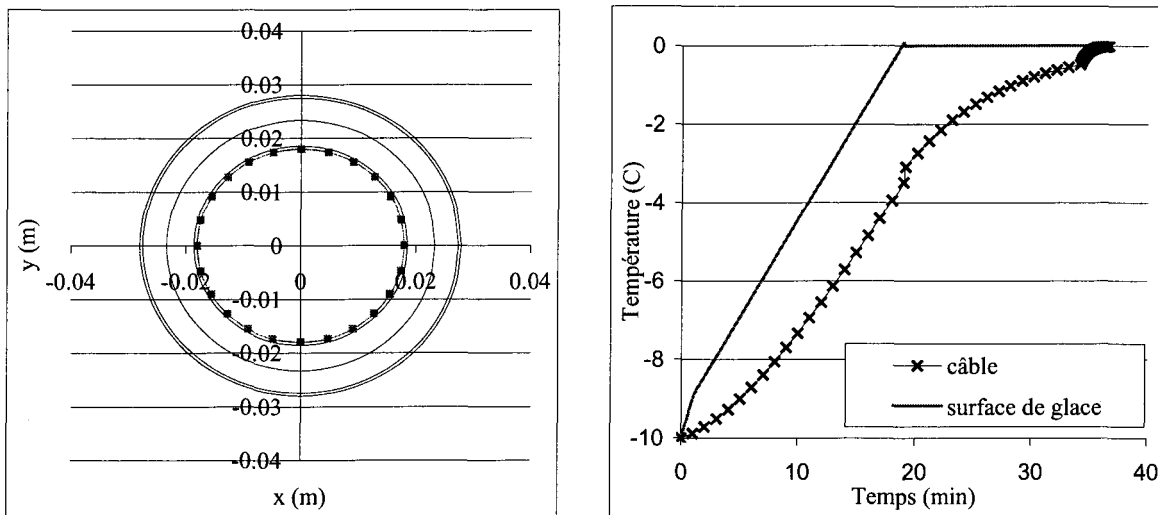


Figure A4.2 : $\varepsilon = 10 \text{ mm}$, $q = 200 \text{ W/m}^2$

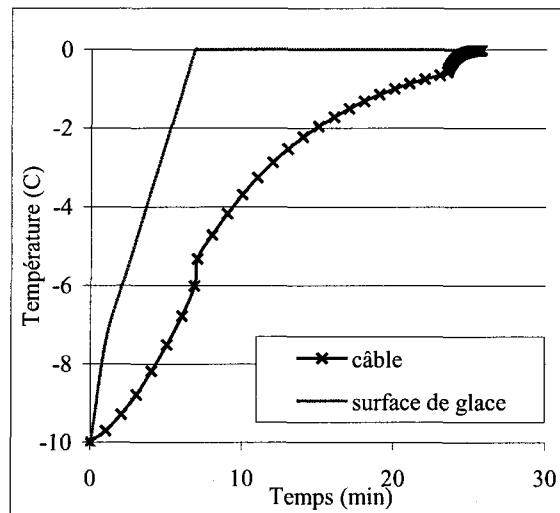
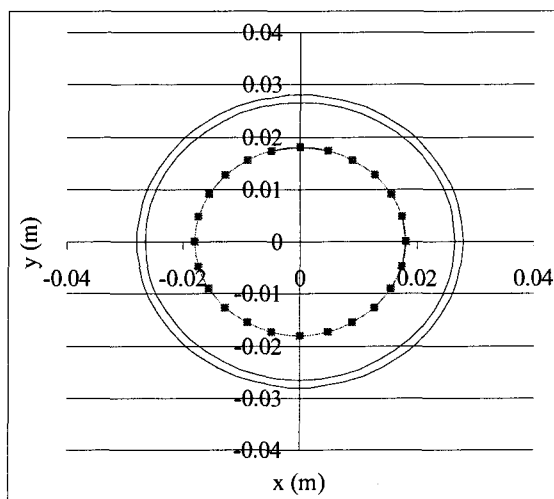


Figure A4.3 : $\varepsilon = 10$ mm, $q = 500$ W/m²

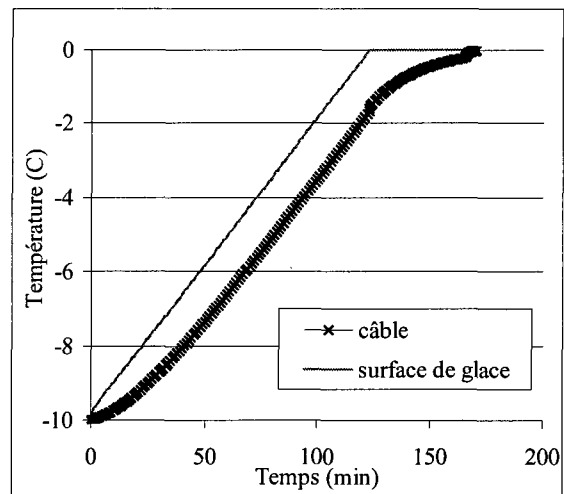
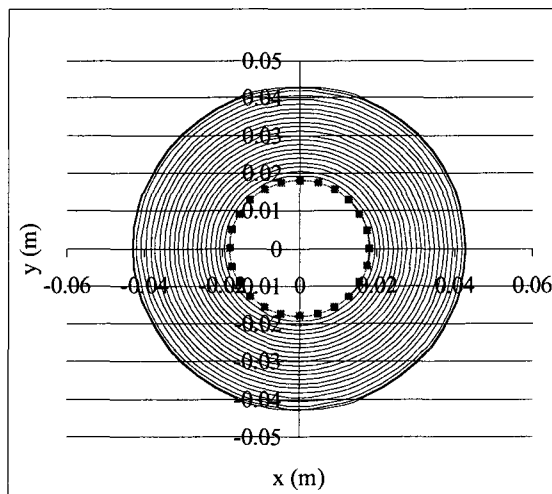


Figure A4.4 : $\varepsilon = 25$ mm, $q = 50$ W/m²

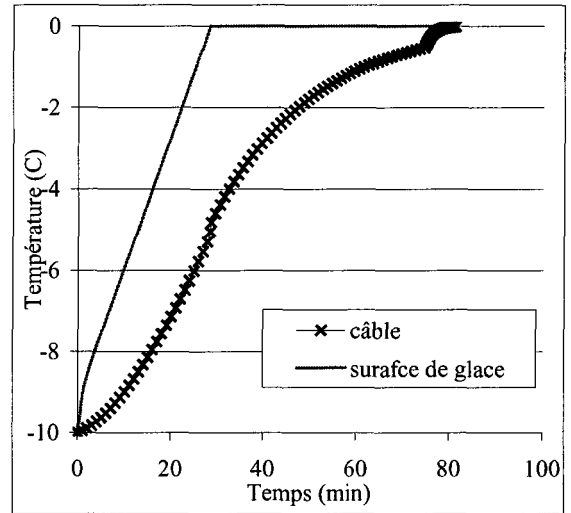
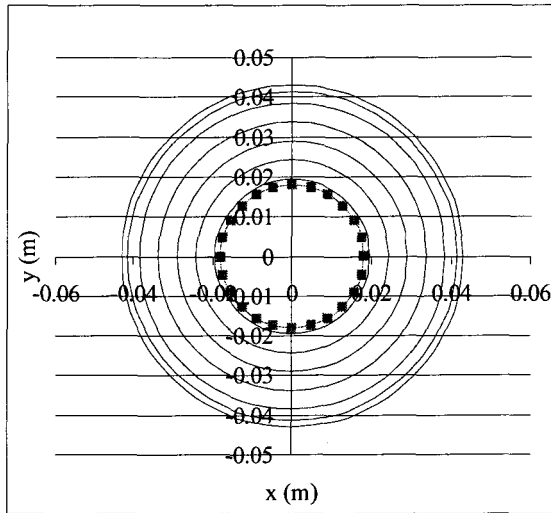


Figure A4.5 : $\varepsilon = 25 \text{ mm}$, $q = 200 \text{ W/m}^2$

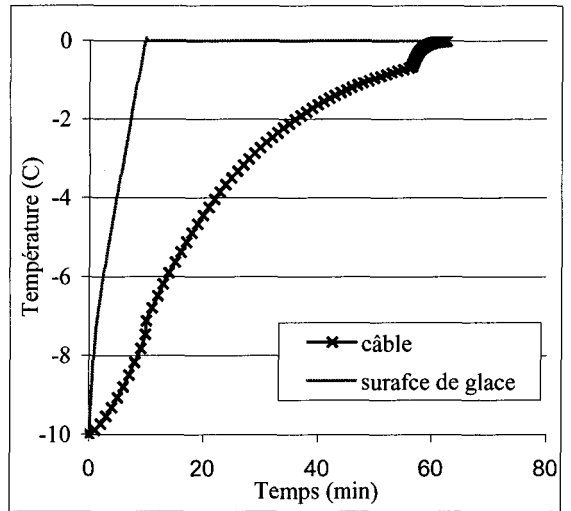
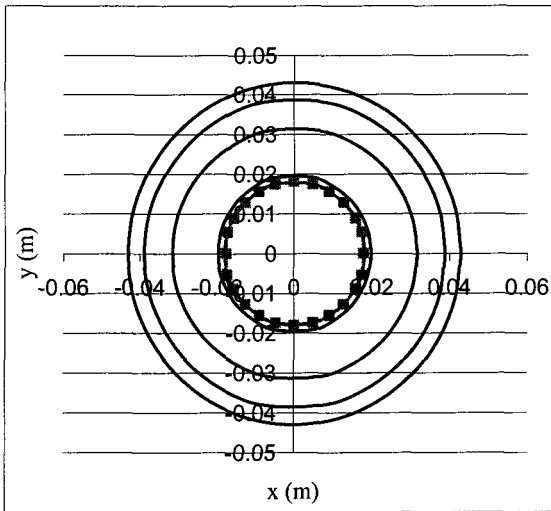


Figure A4.6 : $\varepsilon = 25 \text{ mm}$, $q = 500 \text{ W/m}^2$

ANNEXE DU CHAPITRE 6

	2,5	3	4	5	6	7	8	9
Hélice 1	2,76	3,59	5,68	8,29	11,05	13,25	16,02	17,86
Hélice 2	2,79	3,89	5,92	8,21	11,07	13,76	16,32	19,12
Hélice 3	2,67	3,87	6,07	8,49	11,36	14,16	16,92	19,26
Hélice 4	3,01	4,04	6,12	8,34	11,00	13,95	16,81	18,68
Hélice 5	2,92	4,24	5,93	8,28	11,03	13,85	16,47	19,05
Hélice 6	2,95	3,94	5,79	8,22	10,46	13,89	17,37	19,09
Moyenne	2,85	3,93	5,92	8,30	11,00	13,81	16,65	18,84

Tableau A6.1 : Vitesse du vent en m/s prise directement en face des hélices pour différentes lectures du potentiomètre

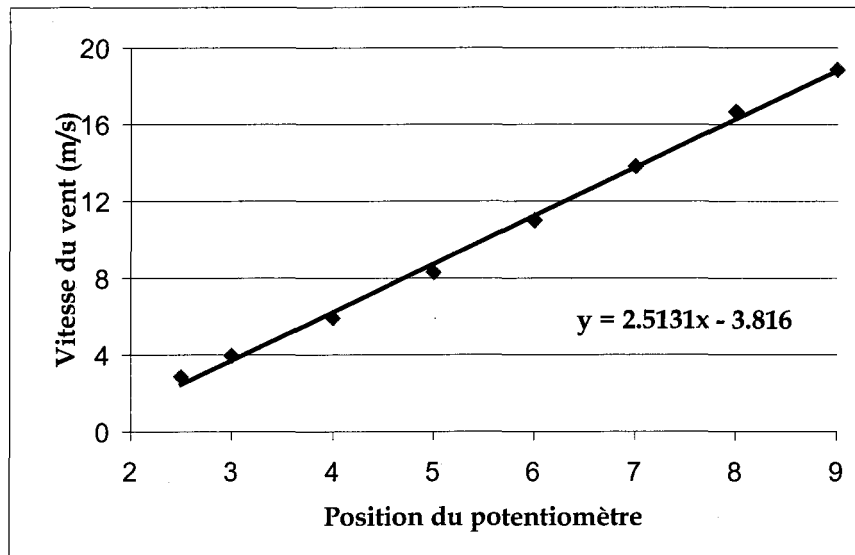


Figure A6.1 : Vitesse moyenne du vent en face des hélices en fonction de la position du potentiomètre calculée par la méthode de Simpson

	0 m	0,3 m	0,6 m	0,9 m	1,2 m	1,5 m	1,8 m
Vitesse (m/s)	4,86	5,21	5,59	5,55	6,16	4,92	5,4

Tableau A6.2 : Moyenne de la vitesse du vent du câble de 1,8 m (lecture 7 du potentiomètre)

	0 m	0,22 m	0,43 m	0,65 m	0,86 m
Vitesse (m/s)	5,9	4,3	2,5	2,8	1,6

Tableau A6.3 : Moyenne de la vitesse du vent du câble de 0,86 m (lecture 7 du potentiomètre)

Les mesures sont données en fonction de la distance entre l'extrémité gauche qui est l'origine de l'axe des mesures et l'extrémité droite du câble. L'extrémité gauche est prise par convention si l'on regarde le câble de l'extérieure de la chambre froide.

Les valeurs des tableaux (A6.2) et (A6.3) sont la moyenne de quatre mesures prises pour chaque position. Les mesures de la vitesse du vent montrent que les valeurs situées à gauche sont plus élevées que les autres valeurs.

Suite à des tests de fumée (à l'aide d'un générateur de fumée) dans la chambre froide, nous avons remarqué l'existence d'un vortex créé par l'échangeur d'air. Ce vortex dirige le vent vers la partie gauche du câble ce qui entraîne une augmentation de la vitesse du vent dans cette région.

Diamètre (μm)	Nombre de gouttes (N)	% de N total	% de N accumulé	Volume (μm^3)	% du volume total	% du volume accumulé
5	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
15	9	4,29	4,29	95377,50	0,10	0,10
20	25	11,90	16,19	628000,00	0,65	0,75
25	23	10,95	27,14	1128437,50	1,17	1,93
30	26	12,38	39,52	2204280,00	2,29	4,22
35	22	10,48	50,00	2961805,00	3,08	7,30
40	18	8,57	58,57	3617280,00	3,76	11,07
45	15	7,14	65,71	4291987,50	4,47	15,54
50	15	7,14	72,86	5887500,00	6,13	21,66
55	15	7,14	80,00	7836262,50	8,16	29,82
60	4	1,90	81,90	2712960,00	2,82	32,64
65	5	2,38	84,29	4311612,50	4,49	37,13
70	11	5,24	89,52	11847220,00	12,33	49,46
75	6	2,86	92,38	7948125,00	8,27	57,73
80	6	2,86	95,24	9646080,00	10,04	67,77
85	1	0,48	95,71	1928352,50	2,01	69,78
90	2	0,95	96,67	4578120,00	4,76	74,55
95	3	1,43	98,10	8076472,50	8,41	82,95
100	1	0,48	98,57	3140000,00	3,27	86,22
105	1	0,48	99,05	3634942,50	3,78	90,00
110	1	0,48	99,52	4179340,00	4,35	94,35
115	0	0,00	99,52	0,00	0,00	94,35
120	1	0,48	100,00	5425920,00	5,65	100,00
	210	100		96080075	100	

Tableau A6.4 : Distribution du diamètre des gouttelettes à 20 °C

Température de l'air	20 °C
Vitesse du vent	4,9 m/s
Distance entre la lamelle et les gicleurs	2,4 m
Pression d'eau	400 kPa
Débit d'eau dans chaque gicleur	300 ml/min
Pression d'air	100 kPa

Diamètre (µm)	Nombre de gouttes (N)	% de N total	% de N accumulé	Volume (µm³)	% du volume total	% du volume accumulé
5	25	5	5	1636,25	0,01	0,01
10	132	26,4	31,4	69115,20	0,58	0,59
15	88	17,6	49	155509,20	1,30	1,89
20	70	14	63	293216,00	2,44	4,33
25	44	8,8	71,8	359975,00	3,00	7,33
30	31	6,2	78	438253,20	3,65	10,98
35	20	4	82	448987,00	3,74	14,73
40	21	4,2	86,2	703718,40	5,87	20,59
45	17	3,4	89,6	811121,85	6,76	27,35
50	14	2,8	92,4	916300,00	7,64	34,99
55	11	2,2	94,6	958253,45	7,99	42,98
60	3	0,6	95,2	339292,80	2,83	45,81
65	5	1	96,2	718968,25	5,99	51,80
70	8	1,6	97,8	1436758,40	11,98	63,78
75	2	0,4	98,2	441787,50	3,68	67,46
80	1	0,2	98,4	268083,20	2,23	69,70
85	2	0,4	98,8	643111,70	5,36	75,06
90	0	0	98,8	0,00	0,00	75,06
95	2	0,4	99,2	897843,10	7,48	82,54
100	4	0,8	100	2094400,00	17,46	100,00
	500	100		11996331	100	

Tableau A6.5 : Distribution du diamètre des gouttelettes à -10 °C

Température de l'air	-10 °C
Vitesse du vent	4,9 m/s
Distance entre la lamelle et les gicleurs	2,4 m
Pression d'eau	400 kPa
Débit d'eau dans chaque gicleur	300 ml/min
Pression d'air	100 kPa

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4
Masse du cylindre et la glace (g)	38,5	38,5	38,1	38,9
Masse de la glace (g)	1	1	0,6	1,4
Teneur en eau (g/m^3)	5,61	5,61	3,58	7,45

Tableau A6.6 : Valeur de la teneur en eau pour chaque test

Vitesse du vent dans la chambre	4,9 m/s
Température de l'air	-10 °C
Pression d'eau	400 kPa
Pression d'air	100 kPa
Débit d'eau dans chaque gicleur	300 ml/min
Diamètre du petit cylindre	2,55 mm
Longueur du cylindre	0,23 m
Masse initiale du petit cylindre	37,5 g
Densité de la glace	883 kg/m^3
Coefficient de captation E	0,861
Temps d'exposition du cylindre	60 s

Tableau A6.7 : Valeurs des paramètres qui ont servi au calcul de la teneur en eau

	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5
M_g (g)	14,34	19,72	16,03	5,54	4,92
M_s (g)	14,73	20,26	16,3	5,78	5,06
$M_f = M_s - M_g$ (g)	0,39	0,54	0,27	0,24	0,14
$V_f = M_f / \rho_f$ (cm ³)	0,32	0,44	0,22	0,20	0,11
M_h (g)	13,45	18,55	15,13	5,53	4,65
$V_h = M_h / \rho_h$ (cm ³)	16,28	22,46	18,32	6,69	5,63
$V_g = V_h - V_f$ (cm ³)	15,97	22,02	18,10	6,50	5,52
Masse volumique de la glace (g/ cm³)	0,898	0,896	0,886	0,52	0,892

Tableau A6.8 : Procédé de mesure de la masse volumique de la glace

M_g = Masse de la glace

M_s = Masse de la glace + Formvar

M_f = Masse de la pellicule du Formvar

V_f = Volume du Formvar

M_h = Masse de l'huile déplacée

ρ_h = Densité de l'huile à -10 °C, (0,828 g/ cm³)

V_h = Volume de l'huile déplacée

ρ_f = Densité du Formvar à -10 °C, (1,23 g/ cm³)

V_g = Volume de la glace

	m_g (kg)	t (min)	e_t (mm)	E	e_m (mm)	Erreur %
échantillon 1	1,182	50	10,61	0,29	10,4	1,95
échantillon 2	1,176	45	10,56	0,33	12	13,61
échantillon 3	1,155	45	10,41	0,32	10,38	0,27
échantillon 4	1,197	44	10,72	0,34	10,35	3,42
échantillon 5	1,177	46	10,57	0,32	9,84	6,91
échantillon 6	1,244	47	11,06	0,32	12	8,54
échantillon 7	1,247	45	11,08	0,27	12,25	10,58
échantillon 8	1,335	60	11,70	0,32	10,66	8,92
échantillon 9	1,14	45	10,30	0,32	10,75	4,39
échantillon 10	1,197	43	10,72	0,34	10,35	3,42
échantillon 11	1,17	48	10,52	0,30	10,28	2,27
échantillon 12	1,145	60	10,33	0,24	10,48	1,40
échantillon 13	1,179	45	10,58	0,33	10,52	0,61
moyenne	1,196	48	10,70	0,31	10,79	5,1 %

Tableau A6.9 : Valeurs du coefficient de captation et l'épaisseur radiale équivalente

M_g = Masse de la glace

t = Temps d'exposition

e_t = Épaisseur radiale équivalente

e_m = Épaisseur radiale mesurée

E = Coefficient de captation

$$\% \text{ erreur} = \frac{|e_t - e_m|}{e_t}$$

ANNEXE DU CHAPITRE 7

Temps (min)	T _{air}	T ₁	T ₂	(T ₁ +T ₂) /2	C ₁	C ₂	C ₁ + C ₂	% glace	M _{glace} (kg)	% fondu
0	-9,3	-10,3	-10,4	-10,35	405	163	568	100,000	2,6024	0,00
5	-8,5	-10,2	-10,3	-10,25	405	163	568	100,000	2,602	0,00
10	-7,3	-9,8	-10	-9,9	405	163	568	100,000	2,602	0,00
15	-4,8	-9,3	-9,1	-9,2	405	163	568	100,000	2,602	0,00
20	-2,9	-7,8	-8,3	-8,05	405	163	568	100,000	2,602	0,00
25	-1,5	-6,3	-7,2	-6,75	405	163	568	100,000	2,602	0,00
30	0,1	-5,2	-6,2	-5,7	405	163	568	100,000	2,602	0,00
35	1,7	-3,7	-4,8	-4,25	405	163	568	100,000	2,602	0,00
40	2,6	-2,7	-3,9	-3,3	405	163	568	100,000	2,602	0,00
45	3,9	-1,5	-2,7	-2,1	405	163	568	100,000	2,602	0,00
50	4,7	-0,8	-1,7	-1,25	405	163	568	100,000	2,602	0,00
55	5,6	-0,4	-0,9	-0,65	405	163	568	100,000	2,602	0,00
60	6,6	-0,4	-0,3	-0,35	405	162	567	99,824	2,598	0,17
65	7,3	-0,2	-0,3	-0,25	405	160	565	99,472	2,589	0,52
70	8,3	-0,2	-0,2	-0,2	405	158	563	99,120	2,580	0,86
75	8,9	-0,2	-0,2	-0,2	405	156	561	98,768	2,571	1,21
80	9,4	-0,2	-0,2	-0,2	405	154	559	98,415	2,562	1,56
85	9,5	-0,2	-0,2	-0,2	405	153	558	98,239	2,557	1,73
90	9,4	-0,2	-0,2	-0,2	405	152	557	98,063	2,553	1,90
95	9,2	-0,2	-0,2	-0,2	405	150	555	97,711	2,544	2,25
100	8,9	-0,2	-0,2	-0,2	408	149	557	98,063	2,553	1,90
110	9,1	-0,2	-0,2	-0,2	408	147	555	97,711	2,544	2,25
120	9,5	-0,2	-0,2	-0,2	405	147	552	97,183	2,530	2,77
130	8,3	-0,2	-0,1	-0,15	400	145	545	95,951	2,499	3,98
140	8,3	-0,2	-0,1	-0,15	400	143	543	95,599	2,490	4,32
150	9	-0,2	-0,1	-0,15	400	141	541	95,246	2,481	4,67
160	9,8	-0,2	-0,1	-0,15	399	138	537	94,542	2,463	5,36
170	10,1	-0,2	-0,1	-0,15	395	136	531	93,486	2,436	6,40
180	9,7	-0,1	-0,1	-0,1	390	132	522	91,901	2,395	7,95
190	9,1	-0,1	-0,1	-0,1	387	130	517	91,021	2,373	8,82

200	8,5	-0,1	-0,1	-0,1	385	128	513	90,317	2,355	9,51
210	8,5	-0,1	-0,1	-0,1	381	127	508	89,437	2,332	10,38
220	8,9	-0,1	-0,1	-0,1	372	126	498	87,676	2,287	12,10
230	9,8	-0,1	-0,1	-0,1	365	125	490	86,268	2,251	13,49
240	10,3	-0,1	-0,1	-0,1	358	121	479	84,331	2,202	15,39
250	10	-0,1	-0,1	-0,1	354	118	472	83,099	2,170	16,60
260	9,7	-0,1	-0,1	-0,1	352	116	468	82,394	2,152	17,29
270	9,3	-0,1	-0,1	-0,1	348	114	462	81,338	2,125	18,33
280	8,9	-0,1	-0,1	-0,1	344	113	457	80,458	2,103	19,19
290	9,5	-0,1	-0,1	-0,1	333	112	445	78,345	2,049	21,27
300	10,5	-0,1	-0,1	-0,1	320	109	429	75,528	1,977	24,04
310	9,5	-0,1	-0,1	-0,1	317	106	423	74,472	1,950	25,07
320	9,5	-0,1	-0,1	-0,1	315	102	417	73,415	1,923	26,11
330	10,4	-0,1	-0,1	-0,1	305	100	405	71,303	1,869	28,19
340	11	-0,1	-0,1	-0,1	290	94	384	67,606	1,774	31,82

Tableau A7.1 : Données de la phase du délestage par fonte ($T_{\text{air}} = 9\text{ }^{\circ}\text{C}$, $V_{\text{air}} = 0\text{ m/s}$)

T_{air} = température de l'air

T_1 = premier thermocouple

T_2 = deuxième thermocouple

C_1 = premier capteur de force

C_2 = deuxième capteur de force

Masse de la glace = $0,0464 + 0,0045 * (C_1 + C_2)$

RÉFÉRENCES

- Abramowitz, M. et I.A. Stegun, *Handbook of mathematical functions*, 1965, Dover Publications, New York.
- Achenbach, E., *The effect of surface roughness on the heat transfer from cylinders to the cross-flow of air*, 1977, Journal of Heat Mass Transfer, vol. 20, pp. 359-369.
- Admirat, P., M. Maccagnan et B. De Goncourt, *Influence of Joule effect and climatic conditions on liquid water content of snow accreted on conductors*, 1988, 4th International Conference on Atmospheric Icing of Structures, vol. 4, pp. 367-371.
- Aguirre-Puente, J. et R.N. Sukhwal, *Sublimation of ice In frozen dispersed media*, 1984, 3rd International Symposium on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, New Orleans, ASME, vol. 3, pp. 38-44.
- Aguirre-Puente, J., G. Lambrinos et M. Sakly, *Sublimation of ice and frozen dispersed media: physical phenomena, equations and experimental study*, 1984, Research Notes in Mathematics (Free Boundary Problems: Applications and Theory), IV, Pitman Advanced Publishing Program, pp. 305-317.
- Aguirre-Puente, J., M. Sakly, L.E. Goodrich et G. Lambrinos, *Experimental measurements and a numerical method for ice sublimation*, 1985, International Symposium on Ground Freezing, Sapporo, Japan, vol. 2, pp. 1-8.
- Alexiades, V. et D.A. Solomon, *Mathematical modeling of melting and freezing processes*, 1993, Hemisphere Publishing Corporation, Washington, pp. 323.
- Banerjee, P.K. et R.P. Shaw, *Boundary element formulation for melting and solidification problems*, 1982, Developpements in Boundary Element Methods, Applied Science Publications, New Jersey, vol. 2, pp. 1-18.
- Bazitoglu, Y. et P.G. Kroeger, *Fundamentals of phase change: freezing, melting and sublimation*, 1990, The American Society of Mechanical Engineers United Engineering Center, New York.
- Beck, J.V., *Green's function solution for transient heat conduction problems*, 1984, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 27, no. 8, pp. 1235-1244.
- Bernardin, S., *Étude et analyse du délestage de glace atmosphérique sur les câbles*, 1989, Mémoire de Maîtrise, UQAC.
- Beskos, D., *Volume 3: Boundary element methods in mechanics*, First series of Computational Methods in Mechanics, 1983, Edited by Beskos, D.E., pp. 440-498.
- Brebbia, C.A. et J.C.F. Telles, *Boundary element techniques, theory and applications in engineering*, 1984, Springer, Berlin.
- Brebbia, C.A., *The boundary element method for engineers*, 1978, Pentech Press, Londres, 189 p.

- Brunt, D., *Physical and dynamical meteorology*, 1945, Cambridge University Press, 428 p.
- Carslaw, H.S. et J.C. Jaeger, *Conduction of heat in solids*, 1959, 2nd Edition, Oxford University Press, London.
- CEI : Commission électrotechnique internationale, *Charge et résistance des lignes aériennes de transport*, 1991, Rapport Technique 826, pp 214-216.
- Chen, J.P. et P.J. Crutzen, *Solute effects on the evaporation of ice particles*, 1994, Journal of Geophysics Research, vol. 99, pp. 18847-18859.
- Chuang, Y.K. et J. Szekely, *On the use of Green's function for solving melting or solidification problems*, 1971, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 14, pp. 1285-1294.
- Clem, J.E., *Currents required conductor sleet*, 1930, Electrical World, pp. 1053-1056.
- Denaud, V. et P. Guillot, *La neige collante : essai de cartographie du risque sur l'ensemble de la Franc*, 1984, S.H.F. Comité Technique et Section de Glaciologie.
- Dharma-wardana, M.W.C., *Thermal conductivity of ice polymorphs and the ice Clathrates*, 1983, Journal of Physics and Chemistry, vol. 87, pp. 4185-4190.
- Dhatt, G. et G. Touzot, *Une présentation de la méthode des éléments finis*, 1981, Université de Compiègne, Paris, pp. 543.
- Dmitriyev, K.S. et Ya.Ye. Gonik, *A new method for melting ice on overhead transmission lines*, 1997, Electrical Technology, no. 1, pp. 17-28.
- Douglas, R.H., *Growth of precipitation elements by sublimation and accretion*, 1957, Geophysics Research directorate, Air force Cambridge Research centre AMC, Scientific Report MW-26.
- Druez, J. et P. McComber, *Atmospheric icing measurements on test line in a mountain icing site*, 1988, IAHR Ice Symposium, Sapporo.
- Druez, J. et P. McComber, *Ice accretion and shedding on overhead line cables*, 1997, Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference, vol. 2, pp. 647-655.
- Druez, J., D.D. Nguyen et Y. Lavoie, *Mechanical properties of atmospheric ice*, 1986, Cold Regions Science And Technology, vol. 13, pp. 67-74.
- Druez, J., J. Cloutier et L. Claveau, *Étude comparative de la résistance a la traction et a la compression de la glace atmosphérique*, 1987, Journal de Physique, Colloque C1, Supplément no 3, Tome 48, pp. 337-343.
- Druez, J., P. McComber, J-P. Bouchard et B. Debiens, *Adhésion de la glace atmosphérique sur une plaque d'aluminium avec et sans peinture protectrice*, 1985, Rapport 85-07-01, Hydro-Québec.

- Druez, J., S. Louchez et G. Bouchard, *Study of ice shedding phenomenon on cables*, 1990, Proceedings of the Ninth International Conference of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, pp. 143-148.
- Du Nguyen-Dang, *Études des méthodes par impact et à l'huile utilisées pour déterminer le diamètre des gouttelettes dans les brouillards naturels et artificiels*, 1987, Mémoire de Maîtrise, UQAC.
- Dyer, D.F., *Transport phenomena in sublimation dehydration*, 1965, PhD thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Elliott, C.M. et Ockendon, J.R., *Weak and variationnel methods for moving boundary problems*, 1982, Research Notes in Mathematics, Pitman Advanced Publishing Program.
- Farzaneh, M. et J.-L. Laforte, *Ice accretion on conductors energized by AC or DC: a laboratory investigation of ice treeing*, 1994, International Journal of Offshore and Polar Engineering, vol. 4, no. 1, pp. 40-47.
- Fuheng, S. et H. Shixiong, *Icing on overhead transmission lines in cold mountainous districts of southwest china and its protection*, 1988, 4th International Workshop On Atmospheric Icing of Structures, pp. 354-357.
- Garland, J.A., *Some for droplet size distributions obtained by an impaction method*, 1971, Quart. Journal R. of Meteorology., vol. 97, pp. 483-494.
- Gland, H., *Givre, verglas, neige collante: nature des phénomènes et situations météorologiques correspondantes*, 1984, Journée d'Étude sur la Protection des Lignes Aériennes vis à vis des Phénomènes de Givre, de Neige et de Verglas, Clamart.
- Godard, S., *Mesure des gouttelettes de nuages avec un film de collargol*, 1960, Bulletin de l'Observatoire du Puy de Dome, no. 2, pp. 41-46.
- Gold, L.W. et G.P. Williams, *Energy balance during the snowmelt period at an Ottawa site*, 1960, International Association Scientific of Hydrology, General Assembly oh Helsinki, pp. 288-294.
- Guzairov, M.B. et R.M. Rudakova, *Determination of voltage levels of users for severe ice melting by balanced currents*, 1980, Soviet Power Engineering, no. 11, pp. 1418-1423.
- Hallam, S.D., P. Duval et M.F. Ashby, *A study of cracks in polycrystalline ice under uniaxial*, 1987, Journal de Physique, Colloque C1, Supplément no 3, Tome 48. pp. 303-311.
- Haltiner, G.J. et F.L. Martin, *Dynamical and physical meteorology*, 1957, McGraw-Hill Book Company, Toronto.
- Hand, I.F., *Pyrheliometers and Phrheliometric measurements*, 1946, U.S. Bureau, Washington, D.C.

- Hay, J.E., *Analysis of solar radiation data for selected locations in Canada*, 1977, Climatological Studies, no. 32, Pêches et environnement Canada, Atmospheric Environment.
- Hobbs, P.V., *Ice physics*, 1974, Clarendon Press Oxford, pp. 346-391.
- Holman, J.P., *Heat transfer*, 1990, McGraw-Hill, New York, 2nd Edition.
- Hong, S. et K. Schwerdtfeger, *Computation of the solidification of pure metals in plate geometry using the Green's function method*, 1998, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 41, pp. 3265-3278.
- Hu, H. et S.A. Argyropoulos, *Mathematical Modeling and Experimental Measurement of Moving Boundary Problems Associated With Exothermic Heat of Mixing*, 1996, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 39, no. 5, pp. 1005-1021.
- Ilinca, A., F. Ilinca et L. Ignat, *Numerical study of iced conductors aerodynamics*, 1996, 7th International Workshop On Atmospheric Icing of Structures. pp. 39-43.
- Imai, I., *Studies on ice accretion*, 1953, Researches on Snow and Ice, no. 1, pp. 35-44.
- Incropera, F.P. et DeWitt, D.P., *Introduction to heat transfer*, 1990, John Wiley & Sons, Second Edition, pp. 824.
- Irvine, H.M., *Cable structures*, 1981, The MIT Press, Series Instructional Mechanics.
- Jakubowski, G.S. et W.S. Janna, *Heat transfer analysis to ice objects melting in air*, 1989, HTD-116, American Society of Mechanical Engineers, vol. 116, 63 p.
- Jaluria, Y. et K.E. Torrance, *Computational Heat Transfer*, 1986,. Series in computational methods in mechanics and thermal sciences, pp. 81-147.
- Jamaledidine, A., R. Beauchemin, J. Rousselet et G. McClure, *Weight-dropping simulation of ice-shedding effects on an overhead transmission line model*, 1996, 7th International Workshop On Atmospheric Icing of Structures. pp. 44-48.
- Jiusto, J.E., *Cloud particle sampling*, 1965, Report No.6 NSF G 24850 Department of Meteorology, Pennsylvania State University, pp. 19.
- Kahraman, R., H.D. Zughbi, Y.N. Al-Nassar, M.A. Hastaoglu et N. Sobh, *A simplified numerical model for melting of ice with natural convection*, 1998, International Communications in Heat and Mass Transfer, vol. 25, no. 3, pp. 359-369.
- Kondo, J. et T. Yamazaki, *A prediction model for snowmelt, snow surface temperature and freezing depth using heat balance method*, 1990, journal of Applied Meteorology, vol. 29, pp. 375-384.
- Konzelmann, T., R.S.W. Van de Wal, J.W. Greuell, R. Bintanja, E.A.C. Henneken et A. Abe-Ouchi, *Parameterization of global and longwave incoming radiation for the Greenland ice sheet*, 1994, Global and Planetary Change, vol. 9(1-2), pp. 143-164.

- Kuroiwa, D., *Icing and snow accretion on electric wires*, 1965, US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Research Report 123, pp. 1-10.
- Kuroiwa, D., *Icing and snow accretion*, 1958, Monograph Series of the Research Institute of Applied Electricity, no. 6, pp. 1-30.
- Laforte, J.-L. et L.C. Phan, *Détermination des caractéristiques physiques et mécaniques des dépôts de givre et de verglas*, 1981, Rapport préparé pour Hydro-Québec, Montréal, pp. 1-180.
- Laforte, J.-L., C.L. Phan, B. Felin et R. Martin, *Adhesion of ice on aluminum conductor and crystal Size in the surface layer*, 1982, 1th International Workshop On Atmospheric Icing of Structures, pp. 83-91.
- Laforte, J.-L.; M.-A. Allaire et D. Asselin, *État de l'art du dégivrage des conducteurs et des câbles aériens*, 1994, Rapport Hydro-Québec 94-01.
- Lambrinos, G., J. Aguirre-Puente et M. Sakly, *Experimental research on the sublimation of ice samples*, 1987, Annales Geophysicae, 5B, (6), pp. 589-594.
- Lamontagne, C. et M. Bouchard, *Contribution des pertes à la non formation et à la fonte de la glace sur les conducteurs*, 1970, Rapport de recherche d'Hydro-Québec.
- Lenneth, R., D. Nethercot, W. Griffiths et R. Evans, *The finite element method*, 1979, Eyrolles, 228 p.
- Lliboutry, L., *Traité de Glaciologie*, 1964, Masson, Paris, pp. 315-365.
- Lozowski, E.P. et J-F. Gayet, *The atmospheric icing: a review*, 1988, 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, pp. 1-6.
- Lozowski, E.P., J.R. Stallabrass et P.F. Hearty, *The icing: of an unheated, non-rotating cylinder in liquid water droplet-ice crystal clouds*, 1979, Report Laboratory (low Temperature, National Research Council Canada, LTR-LT-96, 61 p.
- Lozowski, E.P., J.R. Stallabrass et P.F. Hearty, *The icing: of an unheated, non-rotating cylinder. Part 1: a simulation model*, 1983, Journal of Climate and Applied Meteorology, vol. 22, pp. 2053-2062.
- Lozowski, E.P., J.R. Stallabrass et P.F. Hearty, *The icing: of an unheated, non-rotating cylinder. Part 2: icing wind tunnel experiments*, 1983, Journal of Climate and Applied Meteorology, vol. 22, pp. 2063-2074.
- Luikov, A.V. et D.P. Lebedev, *Study of ice sublimation process*, 1973, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 16, pp. 1087-1096.
- Makkonen, L. et J.R. Stallabrass, *Experiments on the cloud droplet collision efficiency of cylinders*, 1987, Journal of Climate and Applied meteorology, vol. 26, pp. 1406-1411.
- Makkonen, L., *Modeling of ice accretion on wires*, 1984, American Meteorological Society. pp. 929-939.

- Makkonen, L., *Modeling power line icing in freezing precipitation*, 1996, 7th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures. pp. 195-200.
- Makkonen, L., *Surface melting of ice*, 1997, Journal of Physical Chemistry. B-Condensed Phase, vol. 101, no. 32, pp. 6196-6200.
- Maruyama, M. et K. Hama, *On measurement of cloud particle size by means of MgO smoke*, 1954, J. Met. Soc, Japan, vol. 32, no. 5-6, pp. 167-174.
- May, K.R., *Measurement of airborne droplet by magnesium oxide method*, 1950, Journal Science of Instrument, vol. 27, pp. 128-130.
- McComber, P., D.D. Nguyen et J. Druez, *Prévention par chauffage de la formation de givre ou de verglas sur les conducteurs cylindriques ou toronnés*, 1978, Recherche Canadienne en Génie Électrique, vol. 3, no. 2, pp. 27-33.
- McComber, P., G. Morin, R. Martin et L. Vo Van, *Estimation of combined ice and wind load on overhead transmission lines*, 1983, Cold Regions Science and Technology, no. 6, pp. 195-206.
- McComber, P., J. Druez, D. Bouchard et A. Falgoutyret, *Atmospheric icing load measurements on a cable using the end tension*, 1987, Cold Regions Science and Technology, no. 13, pp. 131-141.
- Michel, B., *Ice mechanics*, 1979, Les presses de l'université Laval, 500 p.
- Molodtsov, B.S., M.M. Seredin et M.E. Izotov, *Requirement for protection of DC ice melting units on overhead lines*, 1989, Elektricheskie Stantsii, no. 7, pp. 75-77.
- Morse, P.M. et H. Feshbach, *Methods of theoretical Physics*, 1953, McGraw-Hill, New York, vol. 1, pp. 857-869.
- Mossop, S.C., *Intercomparison of instruments used for measurement of cloud drop concentration and size distribution*, 1983, Journal of Applied Meteorology, vol. 22, pp. 419-428.
- Nelson, J., *Notes and correspondence: sublimation of ice crystals*, 1998, American Meteorological Society, Journal of the Atmospheric Sciences, vol. 55, pp. 910-919.
- O'Neill, K., *Boundary integral solution of moving boundary phase change problems*, 1983, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 19, pp. 1825-1850.
- Oguchi, H. et al, *Icing on electric wires*, 1953, Researches on Snow and Ice, no. 1, pp. 45-49.
- Ouellet, R., *Étude du problème d'ablation à deux dimensions par la méthode des éléments finis de frontières*, 1987, Mémoire de Maîtrise, UQAC.
- Personne, P. et J.-F. Gayet, *Ice accretion on wires and anti-icing by Joule effect*, 1988, Journal of Applied Meteorology, vol. 27, pp. 101-114.

- Pezard, J., *A method to estimate icing loads on overhead lines*, 1993, Électricité de France, Direction des Études et Recherches.
- Phan, C.L., P. McComber et A. Mansiaux, *Adhesion of rime and glaze on conductors protected by various materials*, 1976, Transaction of CSME., vol. 4, no. 4, pp. 204-208.
- Phillips, D.W. et D. Aston, *Données sur le rayonnement solaire au Canada : Normales, résumés, tableaux et données spécialisées*, 1980, CLI 2-80, Environnement Canada, Service de l'Environnement Atmosphérique.
- Poots, G. et P.L.I. Skelton, *A time-dependent heat and mass transfer model for icing of Overhead transmission lines: Rime-ice and onset of glaze*, 1992, Math. Engng. Ind., vol. 3, no. 4, pp. 265-283.
- Poots, G. et P.L.I. Skelton, *A time-dependent heat and mass transfer model for icing of Overhead transmission lines: The transition from rime to glaze*, 1992, Math. Engng Ind., vol. 3, no. 4, pp. 285-308.
- Poots, G., *Aspects of model for wet-snow accretion on an overhead line conductor*, 1998, 8th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, pp. 185-189.
- Poots, G., *Ice and snow accretion on structures*, 1996, 824 p.
- Rohsenow, W.M. et H.Y. Choi, *Heat, mass and momentum transfer*, 1961, Series in Engineering of the physical Sciences, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 122-125.
- Roshan Fekr, M. et G. McClure, *Numerical modelling of the dynamic response of ice shedding on electrical transmission lines*, 1996, 7th International Workshop On Atmospheric Icing of Structures. pp. 49-54.
- Roshan Fekr, M., G. McClure et D. Hartmann, *Investigation of transmission line failure due to ice shedding effects using dynamic analysis*, 1998, 8th International Workshop On Atmospheric Icing of Structures, pp. 11-16.
- Ryerson, C.C. et P. Kenyon, *Atmospheric ice ablation processes on Mt. Equinox, Vermont, U.S.A.*, 1996, 7th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, pp. 277-281.
- Sarraf, S. et X.T. Zhang, *Modeling ice-cover melting using a variable heat transfer coefficient*, 1996, Journal of Engineering Mechanics - Proceedings of the ASCE, vol. 122, no. 10, pp. 930-939.
- Savadjiev, K. et M. Farzaneh, *A probabilistic study of ice shedding in relation with flashover between overhead line conductors*, IEEE Power Engineering Review, 1997, vol. 17, no. 4, pp. 62.
- Savadjiev, K. et M. Farzaneh, *Probability of flashover due to decrease in distance between power line conductors caused by ice shedding*, 1996, 7th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, pp. 345-350.

- Savadjiev, K., A. Latour et A. Paradis, *Estimation of ice accretion weight from field data obtained on overhead transmission line cable*, 1996, 7th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, pp. 125-130.
- Scavuzzo, R.J., M.L. Chu, et V. Ananthaswamy, *Influence of aerodynamic forces in ice shedding*, 1994, Journal of Aircraft, vol. 31, no. 3, pp. 526-530.
- Schurig, O.R. et C.W. Frick, *Heating and current carrying capacity of bare conductors for outdoor service*, 1930, General Electric Review, vol. 33, no. 3, 141 pp.
- Semaan, S. et X.T. Zhang, *Modeling ice-cover melting using a variable heat transfer coefficient*, 1996, Journal of Engineering Mechanics, vol. 122, no. 10, pp. 930-938.
- Simmons, H.C., *Investigating the commercial instrument market*, 1984, Liquid Particle Size Techniques ASTM STP 848 J.M. Tishroff, R.D. Ingebo and J.B. Kennedy Eds Amer Society for Testing and Materials, pp. 22-32.
- Stallabrass, J.R. et T.R. Ringer, *An appraisal of the single rotating cylinder method of liquid water Measurement*, 1978, National Research Council Canada, Report LTR-LT-92, pp. 1-36.
- Szilder, K., E.P. Lozowski et E.M. Gates, *Some applications of a new, time-dependent cylinder ice accretion model*, 1988, Atmospheric Research, vol. 22, pp. 41-59.
- Szilder, K., M. Waszkiewicz et E.P. Lozowski, *Measurement of the average convective heat transfer coefficient and the drag coefficient for icing shaped cylinders*, 1988, International conference on Atmospheric Icing of Structures, pp. 147-151.
- Transmission and Distribution Committee, *IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors*, 1993, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. IEEE Std 738-1993, 39 p.
- Upadhyay, D.S., *Cold climate hydrometeorology*, 1995, New Age International (p) Limited, Publishers, New Delhi, 345 p.
- Vonnegut, B., R.M. Cunningham et R.E. Katz, *Instruments for measuring atmospheric factors related to ice formation on airplanes*, 1946, Department of meteorology, MIT USA, Report No W3038ac 5443.
- William, R. et Jr. Schaub, *Methods to estimate ice accumulations on surface structures*, 1996, 7th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, pp. 183-188.
- Wrobel, L.C. et C.A. Brebbia, *Boundary Elements in Thermal Problems*, 1981, John Wiley, pp. 91-113.
- Wrobel, L.C. et C.A. Brebbia, *The Boundary elements method for Steady and transient Heat conduction*, 1st international conferences on numerical Method in thermal Problems, 1979, Pineridge Press, pp. 58-73.
- Zienkiewicz, O.C. et R.L. Taylor, *The finite element method : basic formulation and linear problems*, 1991, Paris, collection: AFNOR technique, pp. 620.

Zuo, Z. et J. Oerlemans, *Modelling albedo and specific balance of Greenland ice sheet: calculations for the Sondre Stromfjord transect*, 1996, Journal of Glaciology, vol. 42, no. 141, pp. 305-317.