

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

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

Par

Élie Bérenger LEBATTO

ÉLABORATION D'UN MODELE MORPHOGÉNÉTIQUE D'ACCRÉTION DE GLACE EN 3D  
SUR UN CYLINDRE REPRÉSENTANT UN CONDUCTEUR DE LIGNE AÉRIENNE HORS  
TENSION ET ÉTUDE COMPARATIVE AVEC DES RÉSULTATS EXPERIMENTAUX.

AUTOMNE 2008



### **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.

## ABSTRACT

This thesis describes the use of numerical random walk modelling to predict the shape and mass of accreted ice on fixed and rotating, unheated cylinders, resulting from the impact of freezing raindrops. The model is compared with existing models and with experimental data.

The atmospheric icing of overhead power lines is a major problem, which has to be taken into account in their planning, construction and operation in cold regions. These regions are subject to low temperatures, often accompanied by ice storms, whose socio-economic impacts can be catastrophic. Consequently, it is very imperative to prevent ice accretion or alleviate its effects. Ice accretion prediction using numerical models can assist in mitigating these undesired effects of freezing rain on the power network grid.

Icing of a cylinder is used as a first approximation to the icing of power line conductors and ground wires. The 3D morphogenetic model presented here is intended for freezing rain applications. It predicts the shape and mass of ice accreted on a fixed and rotating unheated cylinder. It is based on the random walk of fluid elements that freeze to form the ice accretion. This approach allows the simulation of glaze icing, produced when unfrozen water flows along the cylindrical surface of the ice accretion before freezing. Typically, such glaze or wet icing is the result of freezing rain. The quintessence of this approach is that an ice accretion is built up by means of discrete particles, one at a time. The progress of each particle is ended either by freezing or by dripping, which is influenced by two model parameters called the freezing probability and the shedding parameter. The freezing probability determines when a fluid element freezes. The shedding parameter emulates the behaviour of a pendant drop. If a particle remains at the tip without freezing for a number of steps equal to the shedding parameter, it drips and leaves the ice structure.

Numerical random walk modeling is a good tool for predicting ice accretion, particularly its shape, because it can includes, step by step, all the relevant physical processes, such as icicle growth, shedding process, heat transfer and their interactions. It also adds “realistic”

stochastic variability to ice accretion shapes, in keeping with experimental observations. This occurs because each simulation is slightly different when a different sequence of random numbers is used, even though the external conditions may be identical.

The results of the 3D numerical morphogenetic model of glaze ice accretion, on both rotating and fixed unheated cylinders, are compared to experimental data. Both qualitative and quantitative comparisons have been made. There is acceptable qualitative agreement between the numerical and experimental data. In a quantitative comparison, the numerical model overestimates the ice accretion mass and icicle length. These differences are believed to be due to certain assumptions in the morphogenetic model. We assumed, for example, that splashing does not occur when droplets impinge on an ice-covered cylinder. Hence model mass might be expected to exceed that found in the laboratory experiments. Our model results have been compared with the results of other models, including those of Jones, Goodwin and Chainé. The equivalent radial thicknesses of the ice accretion formed in these models are bigger by about 15, 33 and 169%, respectively, than that predicted by the morphogenetic model. The shapes of the ice accretion are very different.

The morphogenetic model can take into account the flexibility of power line conductors and ground wires. They are not perfectly horizontal, because of gravity and the flexibility of the materials of which they are made. In the model, the flexibility of a conductor is represented by inclining the cylinder. When a cylinder is perfectly horizontal, we define its angle of inclination to the vertical to be 90°. A decrease of this angle, from 90 to 85° leads to an increase of the ice accretion load, and a decrease in load as the angle drops from 85 to 60°. As explanation for the increase, a particle reaches the bottom of the cylinder more slowly on an inclined cylinder; the decrease is due to the particle's random walk at the extremities of the inclined cylinder.

The numerical, morphogenetic model can also take into account the twisting of power line conductors and ground wires; this twisting occurs as the result of the torque imposed by an asymmetric ice load, along with aerodynamic effects. This phenomenon is approximated in the model by using a rotating cylinder. The ice accretion mass slightly diminishes with increasing rotation speed of the cylinder.

## RÉSUMÉ

Cette thèse décrit un modèle morphogénétique qui prédit la forme et la masse de la glace accumulée sur un cylindre non énergisé, fixe ou tournant, suite à une pluie verglaçante. Les résultats du modèle sont comparés aux résultats expérimentaux et de modèles existants.

Le givrage atmosphérique des câbles et conducteurs de lignes de transmission d'énergie est l'un des facteurs à considérer, dans leur planification, construction et exploitation, dans les régions froides. Celles-ci sont soumises à des températures froides parfois accompagnées de tempêtes de verglas, dont l'impact socioéconomique peut être désastreux. Par conséquent, il est impératif de prévenir cette accumulation où d'en atténuer les effets. Une prédiction réaliste de l'accumulation de verglas est une solution économiquement viable.

Le givrage d'un cylindre est utilisé comme première approximation du givrage des conducteurs de phase ou câbles de gardes des lignes de transport d'énergie. Le modèle 3D présenté ici, traite de l'accumulation de verglas. Il en prédit la forme et la masse accumulée sur un cylindre, fixe ou tournant. Le modèle simule l'écoulement d'un film d'eau liquide à la surface du cylindre givré, par la méthode du «cheminement aléatoire». Cela se traduit par le cheminement aléatoire de particules liquides issues d'une discréttisation du film d'eau. La quintessence de cette approche est la détermination progressive de la glace à partir de chacune des particules. L'issue du cheminement est régie par la probabilité de congélation et le paramètre de délestage. La probabilité de congélation définit quand est-ce que la particule gèle. Quant au paramètre de délestage, il émule le comportement de la masse d'eau pendante sous le cylindre. La particule liquide quitte le cylindre recouvert de glace lorsqu'elle demeure sous le cylindre sans geler pendant une période supérieure au paramètre de délestage.

La méthode du cheminement aléatoire est une approche adéquate pour la prédiction de l'accrétion de glace, car elle permet d'inclure progressivement tous les processus physiques

importants dans la modélisation. Elle simule aisément la formation de glaçons. Le rôle important des glaçons dans l'intensité du givrage s'est avéré.

Les résultats du modèle morphogénétique ont été comparés aux résultats expérimentaux. Cette comparaison s'est faite au plan qualitatif et quantitatif. Il en ressort des vraisemblances au plan qualitatif. Le modèle simule la formation de glaçons tel qu'observé expérimentalement. Mais il existe un écart considérable au plan quantitatif. Il y a une surestimation de la masse et de la longueur des glaçons de l'accumulation par le modèle numérique, dû au fait que le phénomène d'éclaboussure est ignoré. Autrement dit, la totalité du volume d'une particule interceptée est prise en compte dans le processus de givrage.

Les résultats du modèle ont été comparés aux résultats des modèles de Jones, Goodwin, de Chainé et Castonguay. Par ailleurs, les épaisseurs uniformes radiales équivalentes obtenues par ces modèles sont supérieures à celles simulées par le modèle morphogénétique dans une proportion de 15, 33 et 169 % respectivement. Les formes de l'accrétion de glace sont totalement différentes.

En pratique, les conducteurs des lignes électriques ne sont pas parfaitement horizontaux, en raison de la gravité et de leur flexibilité. Lorsqu'un cylindre est horizontal, on définit son angle d'inclinaison à 90°. Une diminution de cet angle de 90 à 85° entraîne une augmentation de la masse de la glace accumulée. Par contre une diminution de l'angle d'inclinaison de 85 à 60°, se traduit par une diminution de cette masse.

Le modèle numérique morphogénétique prend également en compte, la torsion des conducteurs de lignes aériennes de transport d'énergie. En effet, les conducteurs recouverts de glace sont parfois soumis à l'action du vent combinée à celle des forces gravitationnelles dues à la charge de glace qui provoquent leur torsion. Ce phénomène est approximé par un cylindre tournant. Finalement, l'accumulation de glace diminue avec la vitesse de rotation.

## REMERCIEMENTS

Pour cette thèse de doctorat réalisée dans le cadre de la Chaire industrielle CRSNG/Hydro-Québec/UQAC sur le givrage atmosphérique des équipements des réseaux électriques (CIGELE), ma gratitude s'adresse particulièrement mon directeur de thèse, **Pr Masoud Farzaneh**, Titulaire de la CIGELE, qui m'a accordé sa confiance en m'accueillant au sein de son équipe. Je tiens à lui dire merci pour le temps qu'il m'a consacré, me permettant ainsi de profiter de son expertise à travers nos diverses rencontres. Sa promptitude à répondre à toutes mes sollicitations fut remarquable, traduisant ainsi toute sa générosité. Son soutien s'est également présenté sur le plan moral et sur le plan financier. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je ne pourrai faire mes remerciements et oublier mon codirecteur, **Pr Edward P. Lozowski**, du Département des sciences atmosphériques et de la terre de l'Université d'Alberta. Il m'a fait partager sa grande expérience à travers de ses suggestions pertinentes et judicieuses qui m'ont été d'une grande utilité durant ce projet de recherche. Les mots ne suffiraient pas pour lui exprimer toute ma reconnaissance.

Je tiens aussi à remercier tout particulièrement **Wladyslaw Rudzinski** qui a assuré le rôle de coach dans l'apprentissage de la modélisation morphogénétique. Son abnégation et sa patience m'ont aidé durant la genèse de ce projet. Un projet ne peut aboutir sans avoir de début, alors je partage le mérite de ce travail avec lui. Dieu te garde et que les désirs de ton cœur se réalisent.

Tout apprentissage a besoin, comme une jeune plante, d'un sol fertile, de soleil et d'espace pour pousser. Je remercie tout particulièrement mon **Père**, ma **Mère**, mes frères (Achille et Aubin) et ma tante **Linah**, pour le soutien moral et financier dont j'ai bénéficié. Je tiens aussi à remercier la famille **Fofana**, **Dr. Benjamin Allou**, **Arnaud Zinflou**, **Mlle Justine Zogang**, **Mme Sylvette Awoh** et **Dr Moussa Kéita** pour leur présence à mes côtés, durant les moments de joie et de tristesse.

À tous ceux qui n'ont pas été formellement désignés, qu'ils sachent que je leur suis reconnaissant, pour l'aide qu'ils m'ont apporté sous quelques formes que ce soit. Je n'oublie pas les membres de la CIGELE et ceux des sciences de la terre et atmosphériques de l'Université d'Alberta à qui j'exprime mon infinie gratitude pour leur assistance et conseils.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>ABSTRACT .....</b>	<b>i</b>
<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>iii</b>
<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>v</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>vi</b>
<b>Listes des symboles et des abréviations .....</b>	<b>viii</b>
<b>Listes de figures .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>xx</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>xx</b>
<b>CHAPITRE I.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
1.1 Problématique et contexte scientifique .....	1
1.2. Objectifs .....	9
1.2.1. Objectif général.....	9
1.2.2. Objectifs spécifiques.....	9
1.2.3. Originalité du travail de recherche.....	10
1.3. Cadre et méthodologie de travail .....	11
1.3.1. Cadre de travail .....	11
1.3.2. Méthodologie de travail .....	11
<b>CHAPITRE II .....</b>	<b>14</b>
<b>REVUE DE LA LITTÉRATURE.....</b>	<b>14</b>
2.1 Modèles analytiques .....	15
2.1.1 Givre .....	15
2.1.2 Neige mouillée .....	17
2.1.3 Verglas .....	18
2.2 Modèles physiques.....	21
2.3 Modèles pour super ordinateurs.....	37
2.3.1. Modèles physiques améliorés .....	37
2.3.2. Modèles morphogénétiques .....	38
<b>CHAPITRE III .....</b>	<b>44</b>
<b>MODÈLE NUMÉRIQUE .....</b>	<b>44</b>
3.1 Probabilité de congélation .....	50

3.2. Transferts thermiques .....	52
3.2.1. Perte de chaleur par convection .....	53
3.2.2. Perte de chaleur par évaporation .....	56
3.2.3. Flux de chaleur entre les gouttelettes interceptées et la glace sous-jacente .....	57
3.3. Paramètre de délestage .....	58
3.4. Probabilités de mouvement .....	61
3.5. Flexibilité en torsion des câbles et conducteurs .....	68
<b>CHAPITRE IV .....</b>	<b>71</b>
<b>TESTS PRATIQUES EN LABORATOIRE : DISPOSITIF ET PROCÉDURE .....</b>	<b>71</b>
<b>CHAPITRE V .....</b>	<b>84</b>
<b>RÉSULTATS ET DISCUSSION .....</b>	<b>84</b>
5.1 Influence de la température sur le processus d'accumulation de la glace .....	84
5.2 Influence de l'intensité des précipitations .....	103
5.3 Comparaison du modèle morphogénétique avec des modèles existants .....	117
5.4 Tentative de rapprochement des résultats numériques et expérimentaux .....	122
5.5 Influence de la flexibilité du conducteur de ligne sur l'accumulation de glace .....	128
5.6 Accumulation de glace sur un cylindre tournant .....	131
<b>CHAPITRE VI .....</b>	<b>137</b>
<b>CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>137</b>
6.1 Conclusions .....	138
6.1.1 Modélisation et simulations numériques .....	138
6.1.2 Expériences dans le laboratoire des précipitations froides .....	140
6.1.3 Validation du modèle numérique et applications pratiques .....	140
6.2 Recommandations .....	141
6.2.1 Modélisation et simulations numériques .....	141
6.2.2 Expériences pratiques en laboratoire .....	142
6.2.3 Validation du modèle numérique et applications pratiques .....	143
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>144</b>
<b>ANNEXE A : Organigramme du programme numérique .....</b>	<b>153</b>
<b>ANNEXE B : Principaux conducteurs utilisés par Hydro-Québec .....</b>	<b>154</b>
<b>ANNEXE C : Givrage d'un cylindre en rotation ou fixe (trajectoire verticale ou oblique des gouttelettes est verticale) .....</b>	<b>155</b>
<b>ANNEXE D: Givrage d'un cylindre en rotation (trajectoire horizontale des gouttelettes) .....</b>	<b>176</b>

### Listes des symboles et des abréviations

Sigles et symboles	Désignations	Unités
<i>A</i>	Constante utilisée pour calculer le nombre Nusselt	
<i>c</i>	Constante qui dépend de l'efficacité de collision	
<i>C<sub>E</sub></i>	Chaleur spécifique de l'eau	J/kg/K
<i>C<sub>p</sub></i>	Capacité calorifique de l'air	J/kg/K
<i>D</i>	Diamètre du dépôt de glace	cm
<i>d<sub>C</sub></i>	Diamètre du cylindre	m
<i>d<sub>m</sub></i>	Diamètre volumétrique médian des gouttelettes	μm
<i>D<sub>ref</sub></i>	Coefficient de diffusion de vapeur dans l'air à 20°C	m <sup>2</sup> /s
<i>D<sub>va</sub></i>	Coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air	m <sup>2</sup> /s
<i>E</i>	Efficacité de collision	
<i>e<sub>A</sub></i>	Pression de vapeur saturée à la température <i>T<sub>a</sub></i>	Pa
<i>E<sub>E</sub></i>	Espacement des glaçons expérimentaux	mm
<i>E<sub>Gl</sub></i>	Espacement des glaçons	mm
<i>E<sub>N</sub></i>	Espacement des glaçons numériques	mm
<i>e<sub>S</sub></i>	Pression de vapeur saturée à la température <i>T<sub>s</sub></i>	Pa
<i>f</i>	Flèche d'un conducteur de ligne	m
<i>f<sub>r</sub></i>	Facteur de rigidité d'un câble.	
<i>h<sub>C</sub></i>	Coefficient de transfert de chaleur par convection	W/m <sup>2</sup> /K
<i>I<sub>G</sub></i>	Intensité d'accumulation du givre	kg/m/s
<i>I<sub>NM</sub></i>	Intensité d'accumulation de la neige mouillée	kg/m/s

$K$	Coefficient de correction de forme.	
$k$	Distance verticale parcourue par une particule liquide avant son délestage	m
$k_a$	Conductivité thermique de l'air	W/m/K
$L$	Longueur du cylindre	m
$L_E$	Longueur des glaçons de l'accumulation expérimentale	kg/m
$L_{Fu}$	Chaleur latente de fusion de l'eau	J/kg
$L_N$	Longueur des glaçons de l'accumulation numérique	kg/m
$L_v$	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	J/kg
$LWC$	Teneur en eau liquide de l'air	kg/m <sup>3</sup>
$M$	Charge de glace	kg/m
$m$	Constante utilisée pour calculer le nombre de Nusselt	
$M_c$	Masse critique de l'eau pendante sous le cylindre	kg/m
$M_E$	Masse de l'accumulation expérimentale	kg/m
$m_E$	Flux massique de l'eau interceptée par le cylindre recouvert de glace	kg/m <sup>2</sup> /s
$M_N$	Masse de l'accumulation numérique	kg/m
$MVD$	Diamètre volumique médian (Median Volume Diameter)	mm
$n$	Fraction de l'eau qui a gelée.	
$n_c$	Paramètre du champ de congélation.	
$N_c$	Nombre de gouttelettes congelées	
$N_{Gl}$	Nombre de glaçons de l'accumulation	
$N_{in}$	Nombre de gouttelettes libérées pendant le givrage	
$N_{out}$	Nombres de gouttelettes qui atteignent le bas du cylindre sans geler	
$Nu$	Nombre de Nusselt	

$P$	Intensité des précipitations	mm/h
$p$	Pression statique de l'air	Pa
$P_{AR}$	Probabilité de déplacement en amont sur l'axe Z.	
$P_{AV}$	Probabilité de déplacement en aval sur l'axe Z.	
$P_c$	Probabilité de congélation.	
$P_D$	Paramètre de délestage.	
$P_{GN}$	Probabilité de mouvement pour chute verticale des gouttelettes	
$P_{GNY}$	Composante de $P_{GN}$ suivant l'axe Y	
$P_{GNZ}$	Composante de $P_{GN}$ suivant l'axe Z	
$P_{Int}$	Nombre de particules liquides interceptées par l'ensemble de la structure	
$P_{lib}$	Nombre total de particules liquides libérées au cours de la simulation numérique	
$P_n$	Intensité des précipitations par rapport à la normale des surfaces des réservoirs du pluviomètre d'Hydro-Québec	mm/h
$Pr$	Nombre Prandtl	
$P_{XD}$	Probabilité de déplacement vers la droite suivant l'axe X.	
$P_{XG}$	Probabilité de déplacement vers la gauche suivant l'axe X.	
$P_{YB}$	Probabilité de déplacement vers le bas suivant l'axe Y.	
$P_{YH}$	Probabilité de déplacement vers le haut suivant l'axe Y.	
$Q$	Flux moyen de chaleur vers l'air	W/m <sup>2</sup>
$Q_C$	Flux de chaleur par convection	W/m <sup>2</sup>
$Q_{EV}$	Flux de chaleur par évaporation	W/m <sup>2</sup>
$Q_G$	Flux de la chaleur échangée entre les gouttelettes interceptées et la glace sous-jacente	W/m <sup>2</sup>
$Q_R$	Flux de chaleur par radiation	W/m <sup>2</sup>
$Q_V$	Flux de chaleur causé par le réchauffement aérodynamique	W/m <sup>2</sup>

$q_x$	Quantité d'eau recueillie dans le réservoir dont l'ouverture est dans le plan vertical, réservoir 1	ml
$q_y$	Quantité d'eau recueillie dans le réservoir dont l'ouverture est dans le plan horizontal, réservoir 2	ml
$R_1$	Paramètre de description de la forme de l'accumulation de glace	
$R_2$	Paramètre de description de la forme l'accumulation de glace	
$Re$	Nombre de Reynolds	
$ref$	Référence	
$R_{eq}$	Épaisseur uniforme radiale équivalente.	m
$R_{eq}^f$	Épaisseur uniforme radiale équivalente de l'accumulation de glace sur un câble flexible	m
$R_{eq}^m$	Épaisseur radiale équivalente d'un câble de rigidité connue	m
$R_{eq}^r$	Épaisseur uniforme radiale équivalente de l'accumulation de glace sur un câble rigide	m
$R_v$	Constante de gaz parfait de la vapeur d'eau.	J/kg/K
$S$	Constante de Sutherland	K
$Sc$ ,	Nombre Schmidt	
$S_E$	Surface d'une face de la particule de liquide cubique	$m^2$
$s_p$	Surface d'entrée des réservoirs du pluviomètre d'Hydro-Québec	$m^2$
$T_a$	Température de l'air ambiant	K
$t_D$	Période de délestage	s
$t_{pl}$	Temps de collecte des précipitations en vue d'en déterminer l'intensité	s
$T_s$	Température à la surface du cylindre givré	K
$V_E$	Volume d'une particule liquide	$m^3$

$V_G$	Vitesse d'impact des gouttelettes	m/s
$V_T$	Vitesse terminale des gouttelettes d'eau	m/s
$V_v$	Vitesse du vent	m/s
$\alpha$	Coefficient de diffusion thermique,	m <sup>2</sup> /s
$\beta$	Angle d'inclinaison du cylindre	°
$\gamma$	Visibilité	m
$\Delta l$	Arête d'une cellule du domaine	m
$\varepsilon$ ,	Rapport de mélange entre la vapeur d'eau et l'air	
$\mu_a$	Viscosité dynamique de l'air	Pa.s
$\nu_a$	Viscosité cinématique de l'air	m <sup>2</sup> /s
$\pi$	Nombre PI	
$\bar{\rho}$	Densité moyenne du dépôt de glace	g/cm <sup>3</sup>
$\rho_a$	Densité de l'air	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_e$	Masse volumique de l'eau	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_g$	Densité de la glace	kg/m <sup>3</sup>
$\Phi$	Angle d'impact des gouttelettes d'eau	°

### Listes de figures

Figure 1: Accumulation de verglas sur un conducteur de ligne de transport d'énergie électrique en Espagne, Janvier 2004.....	3
Figure 2 : Population et panne de courant lors de la tempête de verglas de 1998 .....	5
Figure 3 : Le Modèle de Makkonen (1984), variation de la fraction gelée de l'eau $n$ et de l'efficacité de la collision $E$ en fonction du temps. Vitesse du vent 20m/s, température de l'air 1°C, diamètre du câble 1cm, teneur en eau liquide des nuages 0,3g/m <sup>3</sup> , diamètre volumétrique médian des gouttelettes 25μm.....	22
Figure 4 : Le Modèle de Makkonen (1984), variation de, la densité de l'accrétion de glace $\rho$ , la densité total du dépôt $\rho'$ , l'intensité du givrage I. Vitesse du vent 20m/s, température de l'air -1°C, diamètre du câble 1cm, teneur en eau liquide des nuages 0,3g/m <sup>3</sup> , diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau 25μm.....	23
Figure 5: Le Modèle de Makkonen (1984), variation de la charge de glace $M$ et du diamètre du dépôt $D$ . Vitesse du vent 20m/s, température de l'air -1°C, diamètre du câble 1cm, teneur en eau liquide des nuages 0,3g/m <sup>3</sup> , diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau 25μm.....	23
Figure 6 : Le Modèle de Makkonen (1984), variation de la charge de glace $M$ et du diamètre du dépôt de glace $D$ en fonction de la pression atmosphérique. Vitesse du vent 10m/s, température de l'air -10°C, diamètre du câble 3,5cm, teneur en eau liquide des nuages 0,3g/m <sup>3</sup> , diamètre volumétrique médian des gouttelettes 25μm, humidité relative 90%.....	25
Figure 7 : Le Modèle de Makkonen (1984), variation de la charge de glace $M$ et du diamètre du dépôt de glace D en fonction du diamètre volumétrique médian des gouttelettes $d_m$ (μm). Les mêmes conditions atmosphériques sont identiques à celles de la Figure 6.....	25
Figure 8 : Le modèle de Lozowski et al. (1979), formes d'accrétion prédictes par le modèle, en fonction de la température ambiante (°C), de la vitesse du vent (m/s), de la teneur en eau liquide des nuages (g/m <sup>3</sup> ) et de la durée du givrage (min).....	29
Figure 9 : Forme de l'accrétion de glace sur un câble rigide, modèle de McComber (1993).....	36

Figure 10 : Accumulation de glace sur un cylindre de diamètre 35mm, obtenue par la simulation d'un modèle morphogénétique, Lebatto et al. (2005). Conditions de simulation : intensité des précipitations 1mm/h, flux de chaleur externe 5W/m <sup>2</sup> , durée de l'accumulation 5h, diamètre du cylindre 35mm, paramètre du champ de congélation 2.....	39
Figure 11 : Résultat de la simulation numérique d'un modèle morphogénétique d'accumulation de glace sur un isolateur de poste, Rudzinski et al. (2005). probabilité de congélation 0,001, paramètre de délestage 1000, paramètre de mouvement 1, paramètre du champ de congélation 5, quantité de précipitation 4mm, angle d'impact des gouttelettes par rapport à l'axe verticale 45°. ....	39
Figure 12 : Représentation schématique du domaine simulation.....	47
Figure 13 : Probabilités de déplacement d'une particule dans chaque direction. L'axe du cylindre est colinéaire à l'axe Z.....	62
Figure 14 : Angle et vitesse d'impact des gouttelettes d'eau, Jones (1996a) .....	64
Figure 15 : Flexibilité du conducteur de ligne représentée par l'angle $\beta$ .....	65
Figure 16: Représentation schématique du domaine simulation pour le givrage du cylindre en rotation. ....	70
Figure 17: Dispositif de contrôle de l'intensité des précipitations, pression de l'air : 0-100psi ; débit de l'eau : 0-650cm <sup>3</sup> /min .....	73
Figure 18 : Dispositif expérimental dans la chambre climatique.....	74
Figure 19 : Anémomètre HHF710 du fabricant OMEGA.....	76
Figure 20 : Pluviomètre d'Hydro Québec .....	77
Figure 21 : Caractéristique du pluviomètre d'Hydro Québec .....	80
Figure 22 : Refroidisseur d'eau.....	81
Figure 23 : Dispositif de lecture de la température de l'eau à la sortie du refroidisseur.....	82
Figure 24 : Procédure de dégagement du conducteur givré. ....	82
Figure 25 : Résultats expérimentaux de l'influence de la température ambiante sur le givrage d'un cylindre. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; longueur du cylindre 1m ;	

intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7 m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du conducteur 90°. La partie supérieure de la barre de métal, limitée par un ruban noir, a une longueur de 5cm. ....	86
Figure 26: Vue arrière du cylindre givré : température de l'air ambiant -3°C et -12°C ; Conditions standard : diamètre du cylindre toronné 35 mm ; longueur du cylindre 0,2 m ; intensité des précipitations 59 mm/h ; vitesse du vent 4,7 m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du conducteur 90°.....	87
Figure 27 : Résultats numériques, surface supérieure du cylindre recouvert de glace en regard du vent, étude de l'influence de la température ambiante – Conditions standard : diamètre du cylindre non toronné 35mm ; longueur du cylindre 0,2m ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.....	89
Figure 28: Résultats numériques, vue de face des accumulations de glace obtenues pour l'étude de l'influence de la température de l'air sur l'accumulation de glace - modèle morphogénétique. Conditions standard : diamètre du cylindre non toronné 35mm ; longueur du cylindre 0,2m ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7 m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée de l'accumulation 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°. ....	91
Figure 29: Influence de la température ambiante sur la fraction gelée de la masse d'eau interceptée. Conditions standard idem à celles de la Figure 28. Écart-type numérique 0,0001 %. ....	93
Figure 30: Influence de la température sur l'épaisseur uniforme radiale équivalente. Conditions standard idem à celles de la Figure 28. Écart-type numérique 0,008mm.....	95
Figure 31 : Influence de la température ambiante sur la masse de la glace accumulée. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°. Écart-type numérique 0,025kg ; Écart-type expérimental 0,1kg. ....	96
Figure 32: Influence de la température sur la longueur des glaçons. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40°; durée de l'accumulation 1h; angle d'inclinaison du cylindre 90°. Écart-type numérique 0,7cm ; Écart-type expérimental 1,3cm. ....	98

Figure 33: Fonctions estimées de l'influence de la température sur la masse de la glace. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h; vitesse du vent 4,7m/s; angle d'impact des gouttelettes 40°; durée du givrage 1h; angle d'inclinaison du cylindre 90°.....	100
Figure 34: Fonctions estimées de l'influence de la température sur la longueur des glaçons. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59 mm/h; vitesse du vent 4,7m/s; angle impact des gouttelettes 40°; durée de l'accumulation 1h; angle d'inclinaison du cylindre 90°.....	101
Figure 35: Influence de la température sur l'espacement des glaçons. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée de l'accumulation 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.....	102
Figure 36: Influence de l'intensité des précipitations sur la masse de glace accumulée. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; Température de l'air ambiant -5°C ; vitesse du vent 4,7m/s ; durée de l'accumulation 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°. Écart-type numérique 0,04kg ; Écart-type expérimental 0,7kg. ....	105
Figure 37: Intensité des précipitations sur la longueur des glaçons. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; Température de l'air ambiant -5°C ; vitesse du vent 4,7m/s ; durée de l'accumulation 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°. Écart-type numérique 0,5cm ; Écart-type expérimental 1,8cm. ....	105
Figure 38: Vue de face des accumulations de glace obtenues numériquement pendant l'étude de l'influence de l'intensité des précipitations sur l'accumulation de glace - modèle morphogénétique. Conditions standard : diamètre du cylindre non toronné 35mm ; longueur du cylindre non toronné 0,2m ; température de l'air ambiant -5°C ; vitesse du vent 4,7m/s ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.....	108
Figure 39: Influence de l'intensité des précipitations sur l'accumulation de glace. Conditions standard : diamètre du cylindre toronné 35mm ; longueur du cylindre toronné 1m ; température de l'air ambiant -5°C ; vitesse du vent 4,7m/s ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 0°. La partie supérieure de la barre de métal, limitée un ruban noir, a une longueur de 5cm. ....	109

Figure 40: Influence de l'intensité des précipitations sur la fraction gelée de la masse d'eau interceptée. Conditions standard idem à celles de la Figure 39. ....	110
Figure 41: Influence de l'intensité des précipitations sur l'épaisseur radiale équivalente de l'accumulation de glace. Conditions standard idem à celles de la Figure 39. Écart-type numérique 0,2mm. ....	111
Figure 42: Influence de l'intensité des précipitations sur l'espacement des glaçons. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; température de l'air ambiant -5°C ; vitesse du vent 4,7m/s ; durée de l'accumulation 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 0°. ....	114
Figure 43: Influence de l'intensité des précipitations sur la longueur des glaçons. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; température de l'air ambiant -5°C ; vitesse du vent 4,7m/s ; durée de l'accumulation 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 0°. ....	114
Figure 44: Influence de la quantité de précipitations sur la masse de glace accumulée. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; température de l'air ambiant -5°C ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'inclinaison du cylindre 0° ; quantité de précipitations, 59mm. ....	117
Figure 45: Épaisseurs uniformes radiales équivalentes (mm) issues des simulations des conditions atmosphériques indiquées au Tableau 9, diamètre du cylindre, 25,4mm ; longueur du cylindre 0,2m. ....	120
Figure 46: Forme de l'accrétion de glace obtenue numériquement par le modèle morphogénétique. Givrage d'un cylindre soumis pendant 10h aux conditions atmosphériques indiquées au Tableau 9, diamètre du cylindre, 25,4mm ; longueur du cylindre 0,2m, volume d'une particule liquide 1mm <sup>3</sup> . ....	120
Figure 47: Impact de la modification du paramètre de délestage sur la masse de glace accumulée- Conditions expérimentales standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°. ....	124
Figure 48: Impact de la modification du paramètre de délestage sur la longueur des glaçons. Conditions expérimentales standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°. ....	124

Figure 49: Impact de la modification de la probabilité de congélation sur la masse de l'accumulation. Conditions expérimentales standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.....	125
Figure 50: Impact de la modification de la probabilité de congélation sur la longueur des glaçons Conditions expérimentales standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée de l'accumulation 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.....	126
Figure 51: Influence de l'efficacité de collecte des gouttelettes d'eau sur la masse de glace accumulée. Conditions expérimentales standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée de l'accumulation 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.....	127
Figure 52: Influence de l'angle d'inclinaison du cylindre, $\beta$ , sur la masse de l'accrétion de glace. Résultats numériques. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; durée du givrage 1h. ....	130
Figure 53: Influence de l'angle d'inclinaison du cylindre, $\beta$ , sur la fraction gelée de l'eau interceptée. Résultats numériques. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; durée du givrage 1h.....	130
Figure 54 : Vue de profil des accumulations de glace sur un cylindre en rotation. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm (le cylindre est transparent) ; température ambiante -3,7°C ; intensité des précipitations 1mm/h ; vitesse du vent 5,28m/s ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90° ; angle d'impact des particules liquides 42°.....	133
Figure 55: Vue de face des résultats numériques du givrage d'un cylindre en rotation. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm (le cylindre est transparent) ; longueur du cylindre non toronné 0,2m ; température ambiante -3,7°C ; intensité des précipitations 1mm/h ; vitesse du vent 5,28 m/s ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°. ....	134
Figure 56: Régime d'accumulation sec. Influence de la vitesse de rotation du cylindre sur la masse de l'accrétion de glace. Conditions standard : diamètre du cylindre 35.1 mm ; température ambiantes -3.7°C ; intensité des précipitations 1mm/h ; vitesse du vent 5.28 m/s ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.....	135

Figure 57: Vue de dessus des résultats numériques du givrage d'un cylindre en rotation. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; longueur du cylindre 0,2m ; température ambiante - 3,7°C ; intensité des précipitations 1mm/h ; vitesse du vent 5,28 m/s ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 0°.....136

**Liste des tableaux**

Tableau 1: Proportion de la population et ménages sinistrés .....	6
Tableau 2 : Types d'accrétion de glace sur les structures. ....	15
Tableau 3 : Coefficients $A$ et $m$ en fonction du nombre de Reynolds pour un cylindre.....	55
Tableau 4: Les MVD en fonction de l'intensité des précipitations .....	68
Tableau 5: Conditions expérimentales pour l'étude de l'influence de la température de l'air ambiant.....	72
Tableau 6: Conditions expérimentales pour l'étude de l'influence de l'intensité des précipitations. ....	72
Tableau 7: Valeurs de la probabilité de congélation et du paramètre de délestage des simulations numériques. Conditions standard : diamètre du cylindre non toronné 35mm ; longueur du cylindre 0,2m ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des particules liquides 40° ; durée de l'accumulation 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.....	90
Tableau 8: Les valeurs des intensités des précipitations et des durées du givrage pour une même quantité de précipitations égale à 59mm/h.....	116
Tableau 9: Conditions atmosphériques simulées .....	118

## CHAPITRE I

### INTRODUCTION

#### 1.1 Problématique et contexte scientifique

Considérant des raisons techniques et économiques, il est pratiquement impossible de construire des réseaux électriques affranchis de défauts de fonctionnements. Les équipements des réseaux électriques sont conçus, bâtis, exploités et entretenus de manière à réaliser le meilleur compromis entre coût et risque de défaillance. Les installations électriques sont assujetties à des défauts ou incidents capables de perturber leur bon fonctionnement. Parmi les causes d'incidents susceptibles d'affecter les réseaux électriques, citons les perturbations atmosphériques, qui peuvent parfois induire des défauts d'isolement de parties des installations électriques sous tensions (foudre par exemple), ou dans les cas extrêmes, mettre en péril la tenue mécanique des équipements des réseaux électriques (vent, neige, givre, verglas).

L'impact des perturbations atmosphériques sur les réseaux électriques est un sujet vaste et ne peut être entièrement débattu dans ce document. Par conséquent, la problématique traitée par ce projet de recherche est circonscrite à l'une des perturbations atmosphériques dont l'impact sur la tenue mécanique des conducteurs de lignes aériennes de transport d'énergie électrique est désastreux, à savoir le givrage atmosphérique. De façon générale, la

glace atmosphérique est un grand nombre de dépôts de natures différentes sur les équipements des réseaux électriques. Les dépôts de glace atmosphériques sont formés par l'accumulation de gouttelettes d'eau en surfusion sur des structures froides. Ces gouttelettes d'eau en surfusion sont à l'état liquide à des températures inférieures de plusieurs dizaines de degrés à 0°C. Elles peuvent être dans cet état de surfusion à des températures pouvant atteindre -40°C.

Par ailleurs, les dépôts de glace atmosphériques les plus fréquents sur les lignes de transmission d'énergie sont le verglas, le givre lourd et le givre léger. Ces types de dépôts ont une texture différente l'une de l'autre et se forment dans des conditions atmosphériques particulières à chacun. Le verglas est transparent avec une densité proche de celle de la glace pure, Eskandarian et Farzaneh (2005). Il est le fait de pluies verglaçantes. Les gouttelettes d'eau en surfusion ont un diamètre compris entre 0,5 et 5 mm. Le givre lourd est moins transparent avec une densité qui varie entre 0,3 et 0,7 g/cm<sup>3</sup>, comparativement au givre léger dont la densité est comprise entre 0,15 et 0,3 g/cm<sup>3</sup>. Le givre léger est de couleur blanche et opaque. Le dépôt de givre léger se produit principalement en présence de nuages ou de brouillards givrants.

L'accrétion de verglas est le plus dommageable, parmi les différents types d'accumulation de glace, pour la tenue mécanique des conducteurs de lignes aériennes. Les pluies verglaçantes sont fréquentes au Canada et au nord des États-Unis d'Amérique, Fikke (2005b). Les températures très basses accompagnées de tempêtes de verglas ont un impact économique et social pouvant être désastreux. La pluie verglaçante est adhérente et

s'agrippe aux structures qu'elle heurte. Elle peut provoquer entre autre une accumulation de glace sur les conducteurs de lignes de transport d'énergie électrique tel que présentée à la Figure 1.



Figure 1: Accumulation de verglas sur un conducteur de ligne de transport d'énergie électrique en Espagne, Janvier 2004<sup>1</sup>.

Cette accumulation conduit à la formation d'une gaine de glace autour des conducteurs de phase et des câbles de garde. Par conséquent, il y a une augmentation du poids des ouvrages qui entraîne ainsi une variation de leur dynamique. Cette accumulation de glace peut provoquer leur rupture ou en modifier leurs caractéristiques aérodynamiques, entraînant parfois leur oscillation à des amplitudes pouvant atteindre plusieurs mètres. L'accumulation de glace peut aussi causer le déclenchement d'arcs électriques sur les

<sup>1</sup> *Fikke, S., M., 2005, "Modern Meteorology and Atmospheric Icing". Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Montreal, Canada, pp.123-130.*

isolateurs et l'effondrement en cascade de pylônes. Cela affecte le bon fonctionnement des réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique. Par conséquent, l'accrétion de glace a un impact sur la continuité de service et les coûts d'entretien des lignes. La réparation des dégâts provoqués par les tempêtes de pluies verglaçantes sur les réseaux de transport et de distribution de l'énergie, est coûteuse. Elle peut atteindre plusieurs centaines de millions de dollars, comme cela fut le cas après la triste et célèbre tempête de verglas de janvier 1998 (Lecomte et al. 1998) (Abley 1998).

La Figure 2 présente la classification des zones touchées par cette tempête, en fonction de l'accumulation de verglas, de la distribution de la population sinistrée, des municipalités, des villages et des paroisses où l'électricité n'avait pas été complètement rétablie une semaine après la catastrophe. Plus de 18 % de la population du Canada, soit 56 % de la population du Québec et 11 % de celle de l'Ontario vivaient dans les régions où il est tombé plus de 40 mm de pluie verglaçante tel qu'indiqué au Tableau 1. En outre, 11 % de la population du Québec a été exposée à des précipitations dépassant 80 mm, Statistiques Canada (no. 16F0021XIB au catalogue).

Une pluie verglaçante n'est pas inédite au Canada. Mais celle qui a frappé l'Est de l'Ontario, le Québec et le Nouveau Brunswick en 1998 était d'une force exceptionnelle. Une de ses conséquences les plus dramatiques est son impact sur les réseaux électriques. Pendant que certaines lignes s'écroulaient sous le poids du verglas, certaines personnes durent quitter leur maison, alors que des entreprises stoppèrent leurs activités malgré elles.

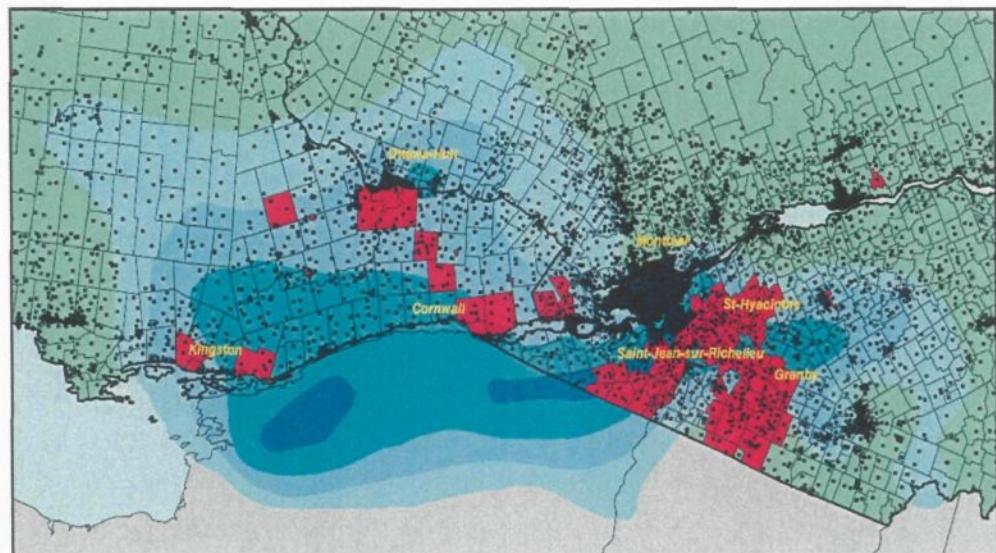


Figure 2 : Population et panne de courant lors de la tempête de verglas de 1998<sup>2</sup>

### Ice thickness (mm) - Épaisseur du verglas (mm)



40 - < 60

60 - < 80

80 - < 100

100+

Urban built-up area / Zone urbaine bâtie

Over 1 week without power \*

Plus d'une semaine sans courant \*



Enumeration area centroid

Centroïde de secteur de dénombrement

<sup>2</sup> Statistiques Canada - n° 16F0021XIB au catalogue

## Population and Households / Population et ménages

Ice thickness (mm) Épaisseur du verglas (mm)	Population			% of Canadian population % de la population canadienne	Households / Ménages			% of Canadian households % des ménages canadiens
	Québec	Ontario	Total		Québec	Ontario	Total	
40 < 60	1 358 550	94 619	1 453 209	5.0	521 029	36 161	557 210	5.1
60 < 80	1 922 646	951 230	2 873 876	10.0	831 402	367 836	1 199 238	11.0
80 < 100	685 670	225 678	911 348	3.1	254 108	84 844	338 952	3.1
100+	165 652	-	165 652	0.6	64 978	-	64 978	0.6
Total	4 132 768	1 271 827	5 404 595	18.7	1 671 518	468 861	2 130 379	19.3

Sources: Environment Canada / Environnement Canada  
Statistiques Canada / Statistique Canada

Tableau 1: Proportion de la population et ménages sinistrés<sup>3</sup>

Cette tempête a occasionné des pertes économiques importantes, à savoir la destruction de 120 000 km de lignes électriques et de câbles téléphoniques, 130 pylônes de transport évalués à 100 000 dollars canadiens chacun et près de 30 000 poteaux de bois à 3 000 dollars canadiens l'unité<sup>4</sup>. Outre l'aspect financier, des conséquences d'ordre social sont également à déplorer. La tempête de verglas enregistrée en 1998 a touché une des régions les plus peuplées de l'Amérique du Nord, laissant plus de 4 millions de personnes sans électricité. Les interruptions de service, survenant par temps froids, sont d'autant plus graves qu'elles se produisent à des moments où l'approvisionnement continu en énergie électrique est vital. Il est essentiel de prévenir ou d'atténuer autant que possible les effets des accrétions de glace sur les conducteurs de lignes de transport d'énergie électrique. Par conséquent, des mesures de nature à assurer un bon fonctionnement des réseaux électriques doivent être prioritairement mises en œuvre.

<sup>3</sup> *Statistiques Canada - n° 16F0021XIB au catalogue*

<sup>4</sup> *Canadian Geographic, mars / avril 1998, pp. 36-37; David Phillips, op. cit.*

Les phénomènes relatifs au givrage atmosphérique étant probabilistes et aléatoires, l'approche statistique est incontournable. L'objectif principal de cette approche est de prévoir ce qui est susceptible de survenir dans le futur. Peut-on s'attendre à une autre tempête de verglas comme celle de 1998 ? Pr. Farzaneh pense qu'il est difficile de répondre de façon affirmative à cette question en raison de plusieurs éléments indéterminés, propos rapportés par Hémond (1999) dans le magazine RÉSEAU. Les données amassées sur de longues périodes sont un atout, mais constituent encore une fenêtre bien étroite sur le phénomène de givrage.

Le surdimensionnement des conducteurs de lignes aériennes de transport d'énergie électrique pour qu'ils puissent supporter des charges de glace plus importantes est une solution qui permettrait de prévenir leur défaillance mécanique. Néanmoins, cette solution est financièrement difficile à réaliser pour les compagnies en charge de l'approvisionnement en énergie électrique. Il faudrait rebâtir le réseau électrique au complet. Au plan technique, un changement dimensionnel des conducteurs de lignes suppose une révision complète de la conception des lignes (nombre de pylônes, flèche des conducteurs, nombre d'isolateurs nécessaire pour supporter la tension mécanique des conducteurs etc.). Par exemple, pour des calibres de conducteurs de lignes plus élevés, il faudrait réduire la portée des lignes pour accroître leur résistance mécanique.

Une prédiction réaliste de l'accumulation de glace serait une solution économiquement viable, Fikke (2005). D'une part, elle permettrait d'exécuter des procédures de déglaçage des lignes de transport d'énergie avant la formation de la charge maximale de glace admise sur ces lignes. D'autre part, identifier le rôle des différents paramètres, notamment

environnementales et météorologiques, pour comprendre l'ensemble des phénomènes associés au givrage atmosphérique et au comportement des équipements, dans l'optique de prévoir ces phénomènes et concevoir des équipements adaptés pour les nouvelles installations. Les efforts consentis jusqu'à présent par plusieurs chercheurs, ont conduit à l'élaboration de nombreux modèles de givrage. Les caractéristiques de ces modèles utilisant différentes approches, sont présentées au prochain chapitre. Ces approches sont basées sur le processus physique de l'accumulation de glace ou sur des observations empiriques.

Les modèles élaborés jusqu'à présent prédisent des charges de glace différentes pour les mêmes conditions atmosphériques. Cela n'est pas surprenant dans la mesure où ils présentent des dissimilarités au niveau des détails de la modélisation du processus de givrage, des données empiriques utilisées et des paramètres atmosphériques qu'ils requièrent comme entrées. Il est alors difficile de les utiliser comme référence dans la prédition de la forme et de la charge de glace, même si Yip et Mitten (1991) tentèrent d'élaborer un modèle de vérification. Ces différents travaux ont contribué à l'avancement des connaissances dans le domaine du givrage atmosphérique des structures, mais du chemin reste à faire. C'est dans cette optique que s'inscrit ce travail de recherche dont l'objectif est de contribuer à l'avancement des connaissances sur le givrage atmosphérique des équipements des réseaux électriques et particulièrement sur les conducteurs des lignes de transport d'énergie électrique pour élaborer des solutions efficaces et efficientes.

## 1.2. Objectifs

### 1.2.1. Objectif général

L'objectif général de ce travail de recherche est d'élaborer un modèle d'accumulation de glace en trois dimensions sur un objet cylindrique représentant les conducteurs de phase des lignes aériennes de transport d'énergie électrique hors tension (ou les câbles de garde). D'autre part, il consiste à la validation de ce modèle au moyen de tests pratiques en laboratoire. Cette thèse se limite au givrage atmosphérique dû à une pluie verglaçante.

### 1.2.2. Objectifs spécifiques

D'un point de vue spécifique, il s'agit de :

- prédire la morphologie et la masse de l'accrétion de glace en fonction des conditions atmosphériques ;
- déterminer les paramètres influençant la forme et la masse de l'accrétion de glace ;
- réaliser le givrage expérimental d'un conducteur de lignes aériennes de transport d'énergie électrique non énergisé, dans une chambre climatique à circulation horizontale ;
- effectuer une étude comparative des simulations numériques du modèle morphogénétique élaboré avec les résultats des tests expérimentaux mentionnés au point précédent ;
- utiliser le modèle numérique morphogénétique élaboré dans ce projet de recherche pour simuler numériquement le givrage d'un conducteur non énergisé soumis à des conditions atmosphériques "similaires" à celles de la célèbre tempête de verglas qui a frappé la province du Québec en janvier 1998.

- comparer le modèle morphogénétique à des modèles existants.
- faire une tentative de validation du modèle morphogénétique d'accumulation de glace due à une pluie verglaçante.

### **1.2.3. Originalité du travail de recherche**

Ce travail de recherche présente une originalité dans la mesure où il constitue le premier modèle morphogénétique en trois dimensions qui traite simultanément l'accumulation de glace et de la formation de glaçons sur un objet de forme cylindrique et en fait une comparaison avec des résultats de tests expérimentaux. L'intérêt pour les glaçons découle du fait que leur formation modifie l'aérodynamique de la captation des gouttelettes des précipitations et accélère l'accumulation de glace. Les glaçons accentuent la charge exercée par le vent en augmentant la surface de l'accumulation de glace soumise à la pression aérodynamique. Cette assertion a été démontrée par Makkonen (1998). Ce modèle est aussi le premier modèle morphogénétique en trois dimensions qui établit une relation directe entre la probabilité de congélation et le paramètre de délestage. Ce travail est le pionnier d'une étude comparative entre les résultats numériques morphogénétiques en 3D et ceux de tests pratiques en laboratoire. Il faut toutefois noter que cette primeur ne concerne que le givrage d'un objet de forme cylindrique. En effet, la comparaison de résultats de simulations d'un modèle morphogénétique avec les résultats de tests expérimentaux fut déjà réalisée. Par contre, ces travaux étaient relatifs au givrage d'un isolateur de poste non énergisé, Rudzinski et al. (2005).

Le modèle numérique élaboré dans ce projet de recherche est le premier modèle morphogénétique capable de simuler l'accumulation de glace sur un cylindre tournant.

### **1.3. Cadre et méthodologie de travail**

#### **1.3.1. Cadre de travail**

La problématique du givrage constitue un domaine de recherche de premier plan pour l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC). Cette recherche sur le givrage est l'œuvre du centre international de recherche sur le givrage atmosphérique et l'ingénierie des réseaux électriques (CENGIVRE) qui assure une mise en commun des expertises et des équipements des unités de recherche dont les activités sont centrées, de façon complémentaire, sur la problématique du givrage atmosphérique des équipements des réseaux électriques et des méthodes de prévention. Les unités de recherche du CENGIVRE sont entre autres, la chaire industrielle sur le givrage atmosphérique des équipements des réseaux électriques (CIGELE), la Chaire de recherche du Canada en ingénierie du givrage des réseaux électriques (INGIVRE). L'un de leurs principaux objectifs est la prédiction de la forme et de la charge de glace accumulée en considération des conditions atmosphériques (température de l'air ambiant, température des gouttelettes, vitesse du vent, direction du vent, intensité de précipitations, etc.) et des conditions de fonctionnement des conducteurs de ligne (courant, dimensions, tension, etc.). Ce projet de recherche est conjointement piloté par les deux chaires, citées ci-dessus, en collaboration avec le département des sciences atmosphériques et de la terre de l'Université d'Alberta.

#### **1.3.2. Méthodologie de travail**

Le givrage d'un cylindre est utilisé comme approximation du givrage d'un conducteur de lignes aériennes de transport d'énergie électrique non énergisées. Les activités de ce travail consistent essentiellement à faire des expériences pratiques en laboratoire, de la

modélisation et des simulations numériques. La modélisation numérique est une bonne approche pour la prédition de la masse et de la forme de l'accrétion de glace. Elle offre la possibilité de prendre en compte plusieurs processus physiques du phénomène de givrage et d'en dégager les interactions. L'avènement d'ordinateurs et d'environnements de développement informatiques modernes offrent de nouvelles perspectives pour la modélisation et la simulation du givrage atmosphérique des structures.

Dans cette quête de prédition du type, de la masse et de la forme de l'accumulation de glace sur les équipements des réseaux électriques, trois genres de modèles sont utilisés. Ce sont les modèles continus (résolution des équations de conservation de masse et de quantité de mouvement), les modèles de cheminement aléatoire (ou Random Walk en anglais) et les modèles basés sur les réseaux de neurones. Les modèles continus se prêtent mieux à la prédition de l'accrétion de glace à géométrie simple. Par contre, les modèles de cheminement aléatoire ne sont pas limités par la complexité géométrique des structures soumises au givrage atmosphérique. Quant aux modèles de réseaux de neurones, ils sont majoritairement utilisés pour la prédition des charges de glace à partir des données météorologiques enregistrées durant des occurrences de tempêtes de verglas antérieures, Larouche et al. (2002), Walid et al. (2003).

Les modèles continus sont incapables de simuler la formation de glaçons durant le processus d'accumulation. Quant aux modèles de réseaux de neurones, ils ne donnent pas de détails sur la forme de l'accrétion de glace. Par contre, les modèles de cheminement aléatoire, communément appelés morphogénétiques, ont l'avantage de pouvoir simuler la

formation de glaçons. Au-delà de prédire la masse de glace accumulée, l'intérêt des modèles morphogénétiques serait de prédire les détails de la forme de l'accrétion comme la formation de glaçons ou stalactites de glace par ruissellement et congélation de l'excès de pluies verglaçante mouillant la surface de l'accumulation de glace. Le rôle crucial des glaçons dans l'intensité du givrage s'est avéré. En effet, les glaçons augmentent la surface de capture des précipitations et tend à accroître la charge totale de glace accumulée. Le modèle numérique découlant de ce travail va reproduire le parcours des gouttelettes de précipitations verglaçantes par la méthode du «cheminement aléatoire» (à la différence du cheminement continu utilisé par les modèles classiques) d'une particule d'eau captée à la surface de l'accrétion, en calculant sa probabilité de congélation pendant de son écoulement et sa probabilité de délestage pour cause de non congélation à la pointe des glaçons.

Le modèle numérique est présenté au Chapitre 3. Les dispositifs et les procédures expérimentales sont présentés au Chapitre 4. La tentative de validation du modèle numérique par le biais d'expériences pratiques, est exposée au Chapitre 5. Celui-ci présente les discussions des résultats obtenus. Le travail s'achève par les conclusions et recommandations présentées au Chapitre 6. Le prochain chapitre, à savoir le Chapitre 2, fait une rétrospective des modèles de givrage atmosphérique de structures existant afin de justifier les méthodes de travail employées.

## CHAPITRE II

### REVUE DE LA LITTÉRATURE

La problématique du givrage est explorée au moyen d'une multitude d'approches comme des observations et des études sur des sites naturels ; des expériences pratiques en laboratoires ; la modélisation et simulation, autant mathématique que numérique. La progression dans ce domaine de recherche a été structurée en trois niveaux par Lozowski et Makkonen (2005). Le premier niveau inclut les modèles analytiques développés à partir d'équations simples facilement solubles à main levée ou à l'aide d'une calculatrice ordinaire. Ces modèles sont basés sur de solides hypothèses ou contraintes physiques relatives au processus de givrage. La majorité de ceux-ci a pour objectif de prédire globalement les propriétés de l'accrétion de glace comme la charge totale de glace par exemple. Ils ne tiennent pas compte des détails physiques du processus de givrage.

De ce fait, un créneau de recherche s'efforçant d'expliquer les détails physiques du givrage atmosphérique débuta vers 1980. Lozowski et al. (1979) et Makkonen (1981) en sont les pionniers. Leur modèle respectif devait être implanté dans un ordinateur personnel pour fonctionner. Compte tenu des carences des premiers ordinateurs, ces modèles se limitaient à des hypothèses simplificatrices. L'avènement d'ordinateurs puissants, a favorisé le développement de nouveaux modèles dits "modèles pour super ordinateurs". En résumé, le progrès de la recherche sur le givrage atmosphérique des

structures est caractérisé par l'avènement successif des modèles analytiques, des modèles physiques et des modèles pour "super ordinateurs".

## 2.1 Modèles analytiques

Le givrage des structures, des conducteurs aériens en particulier, est une situation qui mérite une attention particulière compte tenu des conséquences afférentes. En raison de la complexité du givrage atmosphérique, les chances de prédire, avec une grande précision, les charges de glace par des méthodes simples sont bien minces. Le Tableau 2 présente les propriétés des différents types d'accumulation pouvant découler du givrage atmosphérique.

Type de glace	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Apparence
Verglas	700 – 900	Transparent et claire
Givre lourd	300 – 700	Opaque
Givre léger	150 - 300	Blanc et opaque
Neige mouillée	100 - 850	Blanche

Tableau 2 : Types d'accrétion de glace sur les structures.<sup>5</sup>

### 2.1.1 Givre

Il y a formation de givre, lorsque la chaleur latente de solidification est suffisante pour que toute l'eau liquide de la gouttelette d'eau en surfusion gèle avant l'arrivée d'une autre

<sup>5</sup> CIGRE TB 172, *Guidelines for field measurement of ice loadings on overhead power line conductors, August 2000, p. 11.*

gouttelette au même endroit (surface de la structure givrée). Pour le givre léger en particulier, chaque gouttelette a tendance à conserver sa forme et son identité vis-à-vis des autres gouttelettes. L'approche empirique classique qui estime l'intensité de l'accumulation du givre,  $I_G$  (kg/m/s), se résume à l'Équation (2.1) de Makkonen (1981).

$$I_G = c V_v \quad (2.1)$$

Où  $V_v$  (m/s), est la vitesse du vent ;  $c$ , est une constante fonction de l'efficacité de collision, de la teneur en eau liquide des gouttelettes en chute libre, de la taille et de la forme de la structure soumise au givrage.

La constante  $c$  pour les câbles a été empiriquement déterminée par Makkonen (1984) sur la base de données expérimentales, issues des travaux de Rink (1938), Waibel (1956), Baranowski et al. (1977), et Ahti et al. (1982). Étant donné que cette constante varie avec le type du givre, particulièrement avec la densité, et l'emplacement géographique de l'accumulation, l'Équation (2.1) n'est pas une bonne approximation de l'intensité réelle du givrage.

Diem (1956) proposa des équations non linéaires avec très peu de valeurs prédictives pour des cas particuliers. Étant donné que les erreurs dans l'estimation de l'intensité du givrage ont tendance à faire une moyenne pour des événements sur du long terme. Une telle approche empirique a une certaine validité dans la prédiction d'une charge de glace cumulative, comme le montre les travaux de Sundin et al. (1998). En effet, cette façon de

faire fut, en pratique, largement utilisée pour la prédiction de la forme de glace accumulée sur les conducteurs et les pylônes des lignes de transport d'énergie électrique.

### **2.1.2 Neige mouillée**

La neige sèche n'est pas traitée dans ce travail car elle adhère rarement aux structures. Mais, elle peut y adhérer en présence de faibles vitesses de vent, comme indiqué dans les travaux de Sakamoto et al. (1990), de Peabody (1993) et de Sakamoto et al. (1993). Par conséquent, il ne sera question que de la neige mouillée dans cette section.

La neige mouillée possède une adhérence élevée sur les structures. Elle se forme lorsque la température de l'air est juste au-dessus de la température de solidification de l'eau. Les flocons de neige heurtant la surface de l'objet ou de la glace qui le recouvre, s'agglomèrent sous l'effet des forces aérodynamiques. Le degré d'adhésion de la neige dépend des conditions météorologiques. La présence d'une couche liquide à la surface du flocon de neige, facilite son adhésion à la structure. Le coefficient d'adhésion est proche de 1 pour de faibles vitesses d'impact, une température favorable et des conditions d'humidité. Un coefficient d'adhésion égal à 1 signifie que le flocon de neige intercepté adhère totalement à la structure qu'elle heurte.

L'accumulation de la neige fut estimée par des équations empiriques provenant de tests expérimentaux et d'observations de Poots (1996) et d'Admirat et al. (1988). La toute première approximation du degré d'adhérence de la neige mouillée sur des objets de forme cylindrique a été réalisée par Admirat et al. (1988). Elle stipule que le degré d'adhérence est inversement proportionnel à la vitesse du vent. Le degré d'adhérence est égal à l'unité

lorsque la vitesse du vent est inférieure à 1m/s. Il faut aussi noter que d'autres facteurs, comme la température de l'air et l'humidité, jouent un rôle important dans l'adhésion de la neige mouillée. Partant du fait que la physique de l'adhérence de la neige mouillée ne soit pas bien comprise, elle ne fut pas intégrée à la première approximation.

La teneur en air de la neige, dépend en partie de la vitesse des flocons de neige pour une intensité de précipitations donnée. Pour avoir des résultats réalistes, la teneur en air de la neige devrait être évaluée et prise en compte dans la modélisation de l'accrétion de la neige. Cette dépendance tend à renforcer la complexité de la modélisation, car la vitesse de chute des flocons de neige est fonction de la forme, de la taille et de l'humidité de ces flocons. Makkonen (1989) a essayé de contourner cette difficulté, en tentant d'établir une corrélation entre la composition des flocons de neige et la visibilité. Cette corrélation est représentée par l'Équation 2.2.

$$I_{NM} = 2,1\gamma^{-1,29} \quad (2.2)$$

Où  $I_{NM}$  (kg/m<sup>2</sup>/s) est l'intensité d'accumulation de la neige mouillée et  $\gamma$  (m), la visibilité. Le constat selon lequel il existe peu de travaux traitant de l'accumulation de la neige confirme que la physique du processus d'adhérence de la neige mouillée n'est pas encore bien comprise.

### 2.1.3 Verglas

Le verglas se forme lorsque le flux de chaleur vers l'air n'entraîne pas la solidification de toute l'eau liquide de la gouttelette d'eau en surfusion. Par conséquent, une certaine

quantité d'eau reste ainsi emprisonnée à l'intérieur de la matrice de glace. Lorsqu'une autre gouttelette arrive au même endroit, elles peuvent former de la glace spongieuse, Blackmore et Lozowski (1998), Blackmore (1996), où s'écouler sous l'effet des forces aérodynamiques. Ce phénomène se produit durant une pluie en surfusion, communément appelée pluie verglaçante ou «freezing rain» en anglais.

Lenhard (1955) tenta de faire une estimation de l'accumulation de verglas en utilisant la quantité de précipitation comme l'unique paramètre significatif. Mais McKay et Thompson (1969), puis Snitkovskii (1977) montrèrent que la corrélation entre la charge de glace et la quantité de précipitation était assez faible. La modélisation devrait se faire sur la base de détails physiques du processus de givrage pour espérer avoir des résultats probants. C'est dans cette optique que plusieurs méthodes analytiques furent ourdies et utilisées pendant plus d'un demi-siècle. Citons entre autres, les travaux de Chaîné et al. (1974), Goodwin et al. (1983), et Imai (1953). D'autres approches analytiques incluant celle du modèle de «Meteorology Research Inc.» (MRI), largement utilisée, sont présentés dans les travaux de Krishnasamy et al. (1986, 1993).

Plusieurs tentatives de comparaisons entre les résultats des modèles ainsi développés et les données recueillies lors des tempêtes de verglas ont été effectuées par Krishnasamy et al. (1986, 1993), Félin (1988), McComber et al. (1993), et Yip (1993). L'absence de certaines informations, ou la diversification du lot de paramètres requis en entrée rend cette méthode objective très difficile à réaliser. Toutefois, les modèles ayant un comportement convenable à certaines conditions atmosphériques se comportent différemment lorsqu'il s'agit de conditions extrêmes de verglas, qui bien entendu restent rares et demeurent les

principales considérations dans la conception des équipements des réseaux électriques des pays froids comme le Canada.

D'un point de vue théorique, Makkonen (1996, 1998) et Jones (1996) estimèrent que le modèle de Goodwin et al. (1983), avec des modifications minimes, est préférable aux autres modèles. Il faudrait néanmoins noter que le modèle de Goodwin présente des limites. Par exemple, il ignore le délestage durant le processus d'accrétion. Cela conduit à des intensités de givrage idem pour les différents régimes d'accumulation de glace, humide et sec. Par contre, la majorité des modèles supposent que l'eau qui n'a pas gelée sur la surface du câble est délestée. Il faudrait également préciser que la formation de glaçons, en plus d'accroître l'intensité du givrage par l'interception de gouttelettes d'eau atmosphériques supplémentaires durant leur croissance, constitue un frein au délestage excessif. En effet, la distance potentielle que doit parcourir les gouttelettes d'eau en surfusion qui n'ont pas gelées suite à leur impact sur la surface du câble givré augmente. Cela accroît ainsi leur chance de geler sur la structure givrée Makkonen (1998) montra qu'aucune des hypothèses utilisées dans ces modèles n'est raisonnable pour des températures d'air et d'intensité de précipitation élevées. Ses travaux arguent que l'eau qui n'a pas gelée sur le câble tend à accroître la charge totale de glace, par la formation de glaçons, plutôt qu'à la diminuer. En plus d'accroître la surface exposée à la pluie verglaçante, les glaçons prennent toute leur importance lorsqu'il y a de forts vents. Par conséquent, il faut en tenir compte dans le processus de givrage, afin d'être plus réaliste dans la modélisation.

## 2.2 Modèles physiques

Les modèles analytiques ont amorcé la recherche sur le givrage. Ils ont permis de faire des estimations rapides de la charge de glace avec des hypothèses tendant à simplifier le processus d'accumulation étant donné que les calculs s'opéraient manuellement. Mais une modélisation réaliste du givrage des structures passe impérativement par une prise en compte des détails physiques du processus d'accumulation de glace. Des modèles d'accumulation de glace de grande complexité furent alors élaborés. La résolution manuelle de leurs équations était ardue. L'avènement des ordinateurs dans les années 70 est un fait marquant dans l'élaboration des modèles physiques du givrage atmosphérique d'objets.

Makkonen est parmi les pionniers des modèles physiques. Il présenta en 1984 un modèle numérique à dépendance temporelle modélisant exclusivement le givrage des conducteurs de ligne et des câbles dans lequel la direction du vent est perpendiculaire aux conducteurs et aux câbles de garde. Il supposa une forme cylindrique de l'accrétion de glace durant toute la durée du processus d'accumulation. La variation du flux de l'accrétion fut exprimée en fonction de la taille du dépôt de glace et de la densité de glace. Les conditions d'accumulation de la neige sont ignorées par le modèle. Les résultats des simulations du modèle effectuées par Chen (2001) sont représentés aux Figures 3, 4 et 5. Ils ont été obtenus en utilisant des paramètres d'entrées caractérisant des conditions de givrage atmosphérique sévères. Les graphiques montrent un accroissement de l'intensité du givrage suivi d'une diminution de celle-ci avec le temps. Le régime d'accumulation peut varier d'un régime humide à un régime sec dans les mêmes conditions atmosphériques. La densité de la glace accumulée décroît avec le temps une fois que les conditions du régime sec sont

atteintes. Cela affecte le flux d'augmentation de la charge de glace. La relation entre la charge de glace et les conditions atmosphériques dépend fortement de la durée du givrage.

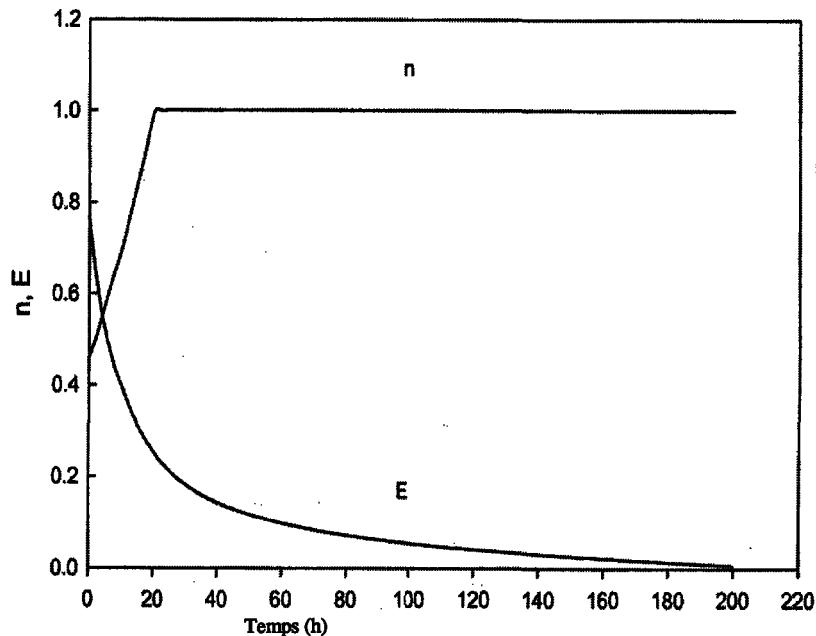


Figure 3 : Le Modèle de Makkonen (1984), variation de la fraction gelée de l'eau  $n$  et de l'efficacité de la collision  $E$  en fonction du temps. Vitesse du vent 20m/s, température de l'air 1°C, diamètre du câble 1cm, teneur en eau liquide des nuages 0,3g/m<sup>3</sup>, diamètre volumétrique médian des gouttelettes 25μm.

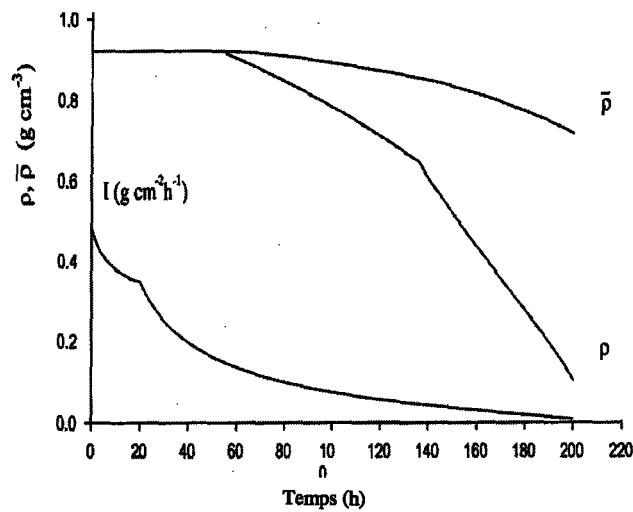


Figure 4 : Le Modèle de Makkonen (1984), variation de la densité de l'accrétion de glace  $\rho$ , la densité total du dépôt  $\bar{\rho}$ , l'intensité du givrage  $I$ . Vitesse du vent 20m/s, température de l'air -1°C, diamètre du câble 1cm, teneur en eau liquide des nuages 0,3g/m<sup>3</sup>, diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau 25μm.

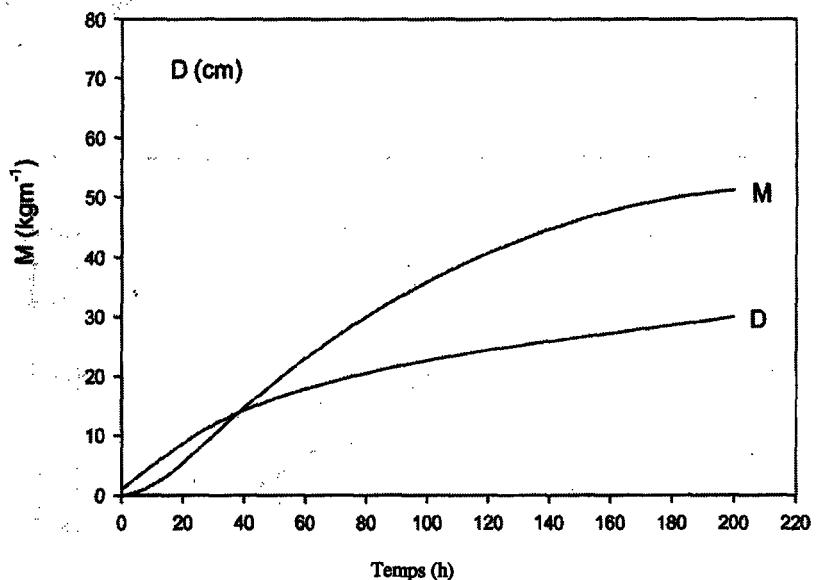
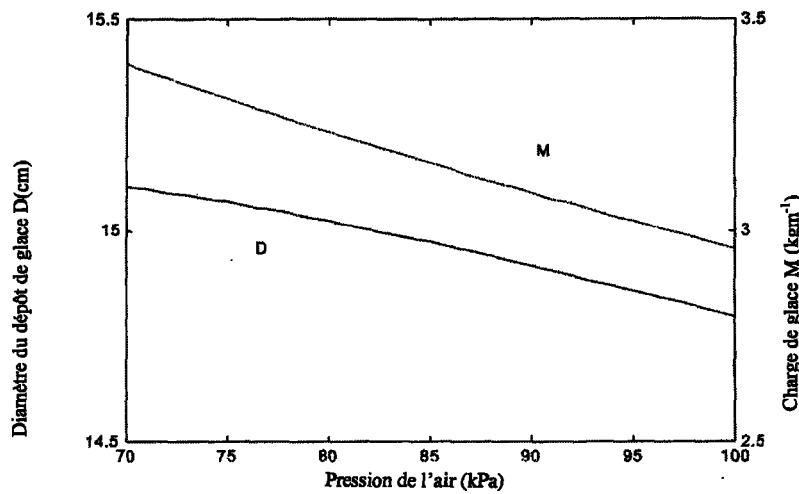
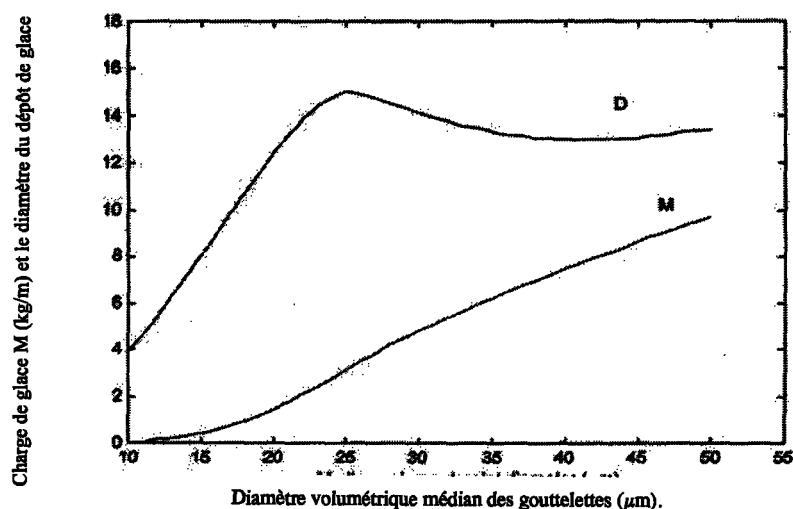


Figure 5: Le Modèle de Makkonen (1984), variation de la charge de glace  $M$  et du diamètre du dépôt  $D$ . Vitesse du vent 20m/s, température de l'air -1°C, diamètre du câble 1cm, teneur en eau liquide des nuages 0,3g/m<sup>3</sup>, diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau 25μm.

Dans son modèle, Makkonen (1984) montra aussi qu'une diminution de la température de l'air ambiant pouvait provoquer une augmentation ou une diminution de la charge de glace dépendamment de la durée du givrage et des autres paramètres atmosphériques. La pression atmosphérique est inversement proportionnelle à l'altitude du site de l'accrétion. Par conséquent, il devient un paramètre important dans la prévision de l'accrétion parce que les conducteurs de ligne de transport d'énergie se trouvent parfois installés en altitude. La Figure 6 présente la charge de glace et le diamètre du dépôt de glace en fonction de la pression atmosphérique. La charge de glace et le diamètre du dépôt de glace décroissent de 13 % et de 2 % respectivement. D'après cette figure, il y a une augmentation de la charge de glace avec l'altitude. Dans ce modèle de Makkonen, l'efficacité de la collision est proportionnelle à la pression atmosphérique. Il y a une diminution plus lente de la densité du dépôt lorsqu'à faible pression atmosphérique le régime d'accumulation passe du régime humide au régime sec. La charge de glace diminuant plus rapidement, le diamètre du dépôt de glace baisse avec la pression atmosphérique. La Figure 7 indique une croissance monotone de la charge de glace avec une augmentation du diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau. Cependant, le diamètre du dépôt de glace culmine près du diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau qui est égal à  $25\mu\text{m}$ . Ce comportement est lié à la durée du givrage. Lorsque la durée du givrage est courte, la valeur maximale du diamètre du dépôt de glace est plus faible. Lorsque la durée du givrage est assez longue (environ 168h ou plus), le pic disparaît, et le diamètre du dépôt de glace croît avec l'accroissement de la médiane volumétrique des gouttelettes.



**Figure 6 : Le Modèle de Makkonen (1984), variation de la charge de glace  $M$  et du diamètre du dépôt de glace  $D$  en fonction de la pression atmosphérique. Vitesse du vent 10m/s, température de l'air -10°C, diamètre du câble 3,5cm, teneur en eau liquide des nuages 0,3g/m<sup>3</sup>, diamètre volumétrique médian des gouttelettes 25μm, humidité relative 90%.**



**Figure 7 : Le Modèle de Makkonen (1984), variation de la charge de glace  $M$  et du diamètre du dépôt de glace  $D$  en fonction du diamètre volumétrique médian des gouttelettes  $d_m$  (μm). Les mêmes conditions atmosphériques sont identiques à celles de la Figure 6.**

Le coefficient de collision défini par Makkonen (1984) a été déterminé sur la base des travaux de Langmuir et Blodgett (1960). Ces derniers ont introduit le coefficient de collision pour caractériser l'efficacité de collision des gouttelettes par un profil géométrique donné. Toutefois, le modèle de Makkonen (1984) fut limité par la méthode empirique utilisée pour déterminer cette efficacité de collision des gouttelettes et le coefficient de transfert thermique convectif. En effet, son modèle est uniquement basé sur une forme cylindrique de la glace accumulée, limitant ainsi son application. Il faut toutefois préciser que l'estimation du coefficient de transfert convectif pour des formes complexes est ardue et n'est pas encore effectuée.

Makkonen (1985) est le premier à utiliser la méthode de couche limite pour calculer le transfert de chaleur pour un câble givrant. Son modèle est le premier à incorporer le transfert de chaleur par radiation dans la modélisation du givrage atmosphérique. Les pluies verglaçantes avec de faibles vitesses de vent conduisent en général à la formation de glaçons. À cet effet, Makkonen (1988) développa un modèle simulant la formation de glaçons, selon les hypothèses suivantes :

- le flux de l'accumulation est constant durant la simulation et identique au flux initial ;
- le processus d'accumulation de glace se fait en une seule étape toute en ignorant les interactions entre la glace en formation et le courant d'air.

Dans ce modèle, le calcul de la masse de glace se fait par étape. À chaque pas de temps, la charge de glace est calculée en fonction de l'intensité du givrage (taux de croissance de

la masse de glace divisé par l'aire de la section du dépôt de glace qui fait face au vent), du diamètre du dépôt, de l'efficacité de collision, et de la fraction gelée de l'eau interceptée. La densité de la glace accumulée et la densité moyenne du dépôt de glace total sont considérées comme les sorties du modèle.

Pendant le processus d'accrétion, les dimensions du dépôt de glace changent. Dans ce modèle, seul le diamètre du dépôt est considéré. L'intensité du givrage est définie comme le produit de l'efficacité de collision, de la fraction gelée, de la vitesse de vent et de la teneur en eau liquide de l'air. Quant à l'efficacité de collision, elle est calculée à partir du diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau surfondue. La fraction gelée est calculée à partir du bilan thermique à la surface de la glace accumulée. La charge de glace est fonction de l'intensité du givrage et du diamètre du dépôt à la fin du pas de temps précédent. La densité de la glace accumulée est également calculée. Elle est obtenue à partir du diamètre volumétrique médian des gouttelettes, de la température moyenne de la surface du dépôt de la vitesse d'impact des gouttelettes dans la région de stagnation. De la charge et de la densité de la glace accumulée, un nouveau diamètre du dépôt est calculé à chaque pas de temps. Les sorties pour un pas de temps particulier sont les paramètres d'entrées pour le prochain pas de temps.

Lozowski et al. (1979) développèrent un modèle simulant la formation de glace sur un cylindre fixe, dont l'objectif initial était le givrage des hélicoptères. Ce modèle prend en compte les conditions de givre et de verglas. Un cylindre est placé dans un courant d'air. Le courant d'air qui a une teneur en eau liquide est constitué d'un nuage de gouttelettes d'eau en surfusion et de cristaux de glace. Les gouttelettes sont supposées être à une température

égale à celle de la température de l'air et se déplaçant à la vitesse du vent. La formulation de ce modèle se décompose en trois parties. La première partie traite du flux local de l'impact des gouttelettes d'eau en surfusion. Ce flux est exprimé en fonction de la position à la surface du cylindre. Quant à la deuxième partie, elle traite du bilan thermique en régime établi dépendamment de cette position pour déterminer la température locale de surface et l'intensité initiale du givrage. Finalement dans la troisième partie, ce flux d'accumulation de glace est utilisé pour prédire le flux local de croissance afin de déterminer l'épaisseur locale de glace après un temps donné. La représentation graphique de ces épaisseurs sur la circonférence du cylindre givré, permettra de déterminer la forme de l'accumulation de glace, l'aire de sa section et sa masse.

Pour déterminer le taux d'empietement local des gouttelettes, la moitié supérieure de la surface du cylindre faisant face au vent est divisée en 19 sections angulaires de  $5^\circ$  chacun, tandis que la moitié inférieure est déterminée par symétrie. Le spectre de la taille des gouttelettes d'eau est divisé en 9 catégories de diamètre d'étendue  $5\mu\text{m}$ . Pour chaque section angulaire et chaque catégorie du spectre, l'efficacité de collision locale est calculée, et l'efficacité de collision globale pour chaque secteur est la masse moyenne pondérée de toutes les catégories du spectre. En utilisant cette efficacité de collision, le flux de masse de l'eau liquide est utilisé pour évaluer les termes de l'équation du bilan thermique en régime établi, qui décrit la thermodynamique de l'accrétion. La fraction gelée peut être obtenue de l'équation du bilan thermique. De cette fraction gelée, le facteur de ruissellement est calculé, et par conséquent le flux de givrage de chaque secteur. Ensuite l'épaisseur locale de glace est obtenue pour une période donnée de givrage. L'interpolation des points

représentant l'épaisseur en fonction de l'angle entraîne une accumulation de la glace possédant une surface lisse. Les formes de l'accumulation prédites par ce modèle pour certains cas qui caractérisent une gamme de formes typiques sont présentées à la Figure 8.

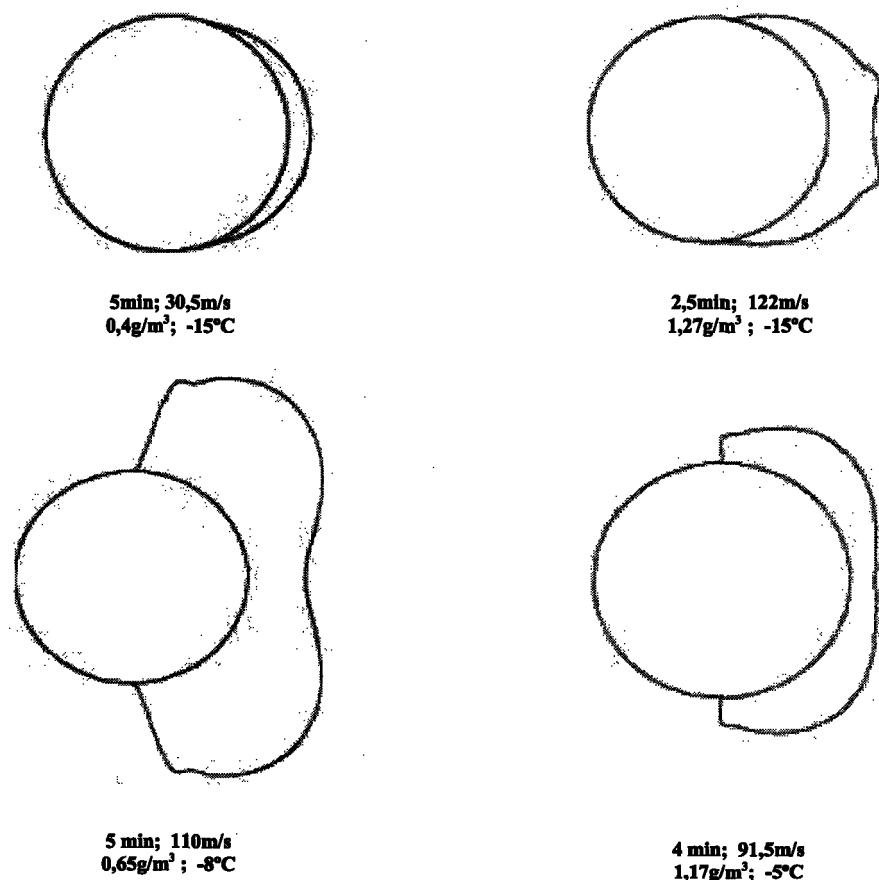


Figure 8 : Le modèle de Lozowski et al. (1979), formes d'accrétion prédites par le modèle, en fonction de la température ambiante (°C), de la vitesse du vent (m/s), de la teneur en eau liquide des nuages (g/m<sup>3</sup>) et de la durée du givrage (min).

Ce modèle (Lozowski et al., 1979) suppose que tous les cristaux de glace interceptés s'accumulaient, aussi longtemps que, la surface de l'accumulation de glace restait humide. Cela s'est avéré ne pas être le cas lors de tests expérimentaux dans une soufflerie impliquant de forts vents. Lozowski et al. (1979) utilisèrent également les travaux de Langmuir et Blodgett (1960) pour déterminer le coefficient de collision, et pour calculer la trajectoire des gouttelettes interceptées par le cylindre dans l'écoulement de potentiel. Cela fournit seulement la distribution du coefficient de collision sur la surface du cylindre exposée au vent. Par conséquent, le modèle ne calcule pas la trajectoire réelle des gouttelettes. Il ne tient pas compte de l'effet joule et utilise les travaux expérimentaux d'Achenbach (1977) sur des cylindres lisses et rugueux, pour déterminer le transfert de chaleur par convection.

Ce modèle ne tient pas compte de l'influence de la croissance de l'accumulation de glace sur l'écoulement de l'air et le transfert de chaleur. Par contre, Lozowski et al. (1979) prirent en compte l'écoulement de la masse d'eau non gelée à la surface de l'objet givré en définissant un nouveau coefficient appelé "facteur de ruissellement". Les détails de la dynamique de ce film d'eau sont ignorés. Le bilan massique d'un volume de contrôle est l'approche utilisée pour traiter cet aspect dans le modèle.

En résumé, il prend en considération une accumulation mixte, le ruissellement, les termes de transfert de chaleur par diffusion induits par la masse évaporée et sublimée, la chaleur de l'eau accumulée et la température à la surface du cylindre givré, la chaleur latente de solidification, le réchauffement aérodynamique. Ce réchauffement

aérodynamique est créée par le travail de la compression adiabatique de l'air dans la couche limite et par l'énergie cinétique des gouttelettes d'eau en surfusion qui heurtent le cylindre.

Ce modèle qui est certes très simple, est approprié pour la prédiction de l'accumulation d'une faible quantité de givre. Il fut utilisé dans la prédiction du givrage des avions. Par contre, pour des quantités importantes de givre ou d'accumulation de verglas, les résultats sont moins satisfaisants. Le modèle est également limité par le fait que l'efficacité de collision et le coefficient de transfert thermique par convection furent calculés à partir d'une forme cylindrique de la glace accumulée. En effet, une telle hypothèse limite le modèle.

Jones (1996a) développa un modèle simulant l'accumulation de glace due à une pluie verglaçante. Dans son modèle, l'efficacité de collision des gouttelettes est égale à l'unité. Aussi, toutes les gouttelettes interceptées par le cylindre gèlent. De ce fait, le mode d'accumulation de la glace simule un régime sec. Cela ne signifie pas qu'il n'y a pas d'eau à la surface mais plutôt qu'il n'y a pas de délestage et d'éclaboussure des gouttelettes.

Jones (1996a) posa une hypothèse simplificatrice, à savoir, une chute verticale des gouttelettes d'eau. Cette accumulation se fait sur une surface plane, perpendiculaire à la trajectoire des gouttelettes. Lorsque le temps est assez froid, les gouttelettes d'eau ne forment pas de flaque d'eau mais gèlent pour former une couche uniforme de glace d'épaisseur constante. Si,  $\rho_G$  est la densité de cette glace ( $900\text{kg/m}^3$ ), des précipitations de  $0,01\text{m}$  conduisent à l'accumulation d'une couche uniforme de glace de  $0,011\text{m}$  d'épaisseur. Ce concept fut étendu aux cylindres. Considérant plusieurs cylindres de diamètres

différents suspendus horizontalement au-dessus du sol et soumis à 0,01m de pluie verglaçante chacun. Si toute l'eau interceptée gèle pour former une accumulation radiale uniforme, alors ce centimètre de précipitation est uniformément étalé à la surface des cylindres comme la glace. Étant donné que le périmètre est plus grand que le diamètre du cylindre d'un facteur  $\pi$ , l'épaisseur radiale équivalente de la glace  $R_{eq}$  sur chaque cylindre est :

$$R_{eq} = \frac{\rho_e}{\rho_g} \frac{1}{\pi} = 35.10^{-4} m \quad (2.3)$$

Où  $\rho_e$  (1000kg/m<sup>3</sup>) est la densité de l'eau et  $\rho_g$  (900kg/m<sup>3</sup>) est la densité de cette glace. Tant que la glace s'accumule uniformément à la surface du cylindre, la section du cylindre reste circulaire. Alors, le rapport du diamètre de chaque cylindre givré sur le périmètre de sa section est égal à  $\frac{1}{\pi}$  pendant la tempête de verglas et l'épaisseur de la couche de glace sur les cylindres est indépendante de leur diamètre.

En considérant le vent, le flux horizontal de précipitation est différent du cas simple. Best (1949) proposa une relation donnant la teneur en eau liquide en fonction de l'intensité des précipitations :

$$LWC = 6,7.10^{-7} \cdot P^{0,846} \quad (2.4)$$

Où  $P$  (mm/h), est l'intensité des précipitations, et  $LWC$  (kg/m<sup>3</sup>), la teneur en eau liquide pour «Liquid Water Content» en anglais. En supposant que toutes les gouttelettes se déplacent horizontalement à la vitesse du vent, le flux horizontal de l'eau s'exprime comme

suit :  $V_v \times LWC$  (kg/m<sup>2</sup>/s) ou  $3600 \times V_v \times LWC$  (kg/m<sup>2</sup>/h) où  $V_v$  (m/s) est la vitesse du vent. Le flux massique total de l'eau,  $m_w$  (kg/m<sup>2</sup>/h), est obtenu par conversion en unités adéquates et de la somme vectorielle du flux horizontal et du flux vertical  $P\rho_e/1000$  (kg/m<sup>2</sup>/h) de précipitations.

$$m_w = [(0,001 \cdot P \cdot \rho_e)^2 + (3600 \cdot V_v \cdot LWC)^2]^{1/2} \quad (2.5)$$

L'Épaisseur radiale uniforme,  $R_{eq}$  (m), de la glace sur un cylindre circulaire, aussi appelée épaisseur radiale équivalente de l'accumulation est donnée par l'Équation (2.6) :

$$R_{eq} = \frac{N}{\rho_g \pi} \sqrt{(0,001 \cdot P \cdot \rho_e)^2 + (3600 \cdot V_v \cdot LWC)^2} \quad (2.6)$$

Avec  $N$ (h) la durée du givrage,  $P$  (mm/h), l'intensité des précipitations, et  $V_v$  (m/s), la vitesse du vent. L'Équation (2.6) montre que l'épaisseur radiale équivalente de l'accumulation de glace dans le modèle de Jones (1996a) est indépendante du diamètre du cylindre, mais dépend de deux paramètres météorologiques, à savoir, l'intensité des précipitations et la vitesse du vent. Précisons que ce modèle repose sur trois principales hypothèses :

- l'efficacité de collecte des gouttelettes par le cylindre est égale à 1. Toutes les gouttelettes interceptées par le cylindre gèlent. Cela ne veut pas dire qu'il n'y a pas d'eau à la surface mais plutôt qu'il n'y a pas de délestage et d'éclaboussure.

- Le mode de distribution du diamètre des gouttelettes est de l'ordre de 1mm pour les pluies verglaçantes.
- La glace s'accumule uniformément à la surface du cylindre, c'est-à-dire que la formation de glaçons et les formes asymétriques sont ignorées.

Le modèle de Chainé et Castonguay (1974) est l'un des premiers modèles mathématiques développés pour le givrage des conducteurs de lignes de transport d'énergie. Ils proposèrent une forme semi elliptique de l'accumulation sur un côté du conducteur. Puis, ils déterminèrent empiriquement un facteur de correction de forme,  $K$ , à partir d'expériences effectuées dans une soufflerie pour le givrage marin, Stallabrass et Hearty (1967). Ce facteur de correction de forme est le rapport de l'aire de la section réelle de l'accrétion de glace sur celle obtenue après l'utilisation de l'hypothèse d'une forme semi-elliptique de l'accumulation de glace. Le facteur de correction de forme est déterminé à partir de données expérimentales. Il est aussi fonction du rayon du câble et de la température de l'air ambiant. Les résultats de ce modèle montrent une forte dépendance entre l'épaisseur radiale équivalente de l'accrétion de glace et le diamètre du câble.

L'hypothèse d'une forme cylindrique de l'accumulation de glace est réaliste pour les câbles ou les conducteurs flexibles. Par contre, des formes non circulaires sont observées pour les conducteurs plus rigides. Cette hypothèse de forme influence l'intensité de l'accumulation sur la section transversale du câble qui intercepte les gouttelettes. Elle prend de l'importance pour une durée de pluie verglaçante assez longue, car elle peut conduire à un écart important dans la prédiction des charges de glace. Afin d'étudier l'effet de cette

hypothèse de forme sur l'accumulation de glace, McComber(2000) présenta un modèle qui stipule qu'une forme non circulaire de manchon de glace est plus réaliste pour les conducteurs rigides. L'hypothèse de forme influence l'intensité du givrage car cette intensité dépend en partie de la section transversale du câble dont le rôle important dans la captation des gouttelettes s'est avéré.

Précisons qu'une estimation exacte de la flexibilité des conducteurs de lignes sur le réseau électrique est presque impossible. Face à cette difficulté, McComber et al. (1993) s'appuyèrent sur une approximation découlant d'une combinaison des deux cas extrêmes, à savoir un conducteur très flexible et un autre très rigide pour proposer un facteur de rigidité qui corrige les résultats du givrage d'un câble de rigidité spécifique. Pour les câbles flexibles, McComber et al. (1993) utilisèrent la même approche que Jones (1996a). Considérant un facteur de rigidité,  $f_r$ , qui peut prendre une valeur comprise entre 0 et 1. Le facteur de rigidité est égal à 1 lorsque le conducteur est fortement rigide, tandis que 0 est associé à un conducteur extrêmement flexible. L'épaisseur radiale équivalente  $R''_{eq}$  pour un câble de rigidité connue peut être estimée comme une charge moyenne de l'épaisseur radiale équivalente d'un câble flexible,  $R'_{eq}$  et de l'épaisseur radiale équivalente d'un câble rigide  $R''_{eq}$ .

$$R''_{eq} = f_r R'_{eq} + (1 - f_r) R''_{eq} \quad (2.7)$$

Partant du fait que la forme de l'accrétion de glace en régime sec sur un conducteur fixe est fortement influencée par l'angle d'impact des gouttelettes et que l'eau ruisselle avant de geler, McComber et al.(1993) suggérèrent une forme simple de l'accrétion de glace, pour

les câbles très rigides, décrite à la Figure 9. Une variation linéaire de l'épaisseur de l'accumulation de glace est distribuée sur les trois quart du périmètre du conducteur. Il posa de façon arbitraire que la masse est égale de chaque côté de la direction d'incidence moyenne des gouttelettes,  $\Phi$ . En absence de vent, il y aurait plus de masse au dessus du conducteur. Par contre, si le vent est violent, la masse est préférentiellement sur le côté. Cette forme est la base du modèle avec câble rigide. Les deux paramètres  $R_1$  et  $R_2$  qui décrivent la forme de l'accumulation sont déterminés à partir de la géométrie de la Figure 9. L'incrément de volume  $R_{eq}$  est obtenu par le produit de l'Équation (2.6), du nombre  $\pi$  et de la section de l'accumulation  $D$ .

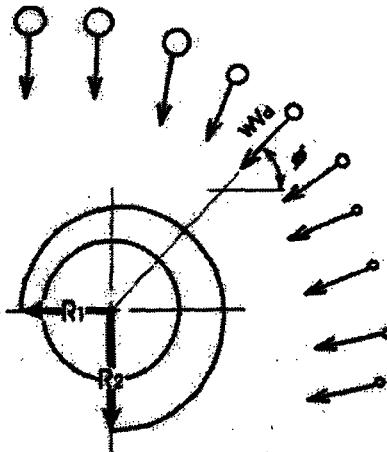


Figure 9 : Forme de l'accrétion de glace sur un câble rigide, modèle de McComber (1993).

Si une approximation rapide de l'épaisseur radiale de glace est requise, la forme de glace peut être encore simplifiée en supposant une épaisseur uniforme sur les trois quarts du périmètre du conducteur (i.e.  $R_1=R_2$ ). Dans ce cas, le terme de droite de l'Équation (2.6) est

divisé par 0,75. Afin d'illustrer l'influence de la forme de glace sur la prédiction de la charge de glace, McComber et al.(1993) comparèrent l'épaisseur radiale équivalente et la charge de glace obtenue sur un conducteur type en utilisant différents modèles et les données météorologiques de la tempête de verglas de Janvier 1998. L'emploi de ce modèle pour le givrage d'un conducteur rigide indique une augmentation significative de 27,3 % par rapport aux charges maximales de glace d'un conducteur de ligne réelle soumis aux forts vents, en comparaison au modèle largement répandu utilisant une forme de glace circulaire.

Cette revue de littérature relative aux modèles physiques se limitera à ceux-ci, sans toutefois oublier de citer certains modèles présentés dans les travaux de McComber et al. (1993), Ackley et Templeton (1979), McComber (1982), Haldar et al. (1996), qui ont apportés d'importantes contributions à la recherche sur le givrage atmosphérique d'objets.

### **2.3 Modèles pour super ordinateurs**

Cette terminologie fut empruntée à Lozowski et Makkonen (2005). Elle fait référence aux modèles qui exigent assez de puissance en termes de temps de calcul. Ils ont été développés dans le nouveau millénaire et se repartissent en deux groupes :

- Modèles physiques améliorés
- Modèles morphogénétiques

#### **2.3.1. Modèles physiques améliorés**

Au départ, ce type de modèles fut développé pour le givrage des avions. Suite à quelques modifications, ils pourraient facilement s'appliquer au givrage des câbles, Lozowski et

Makkonen (2005). Mais cela ne peut se faire car la majorité des modèles sont des marques déposées. Cependant, il eut des modèles spécialement conçus pour le givrage des câbles, comme celui décrit par Fu et al. (2006, 2007).

Ce modèle est en deux dimensions avec une dépendance temporelle. Il calcule un écoulement potentiel de l'air, avec séparation, par la méthode des éléments frontières, couplée à un modèle de couche limite intégrale pour déterminer la distribution du transfert de chaleur sur l'accumulation de glace. Ils traitent (Fu et al. 2006, Fu et Farzaneh 2007) l'écoulement du film d'eau non gelé.

### **2.3.2. Modèles morphogénétiques**

Contrairement aux modèles classiques, ils utilisent une approche originale pour représenter la formation physique de l'accumulation de glace. Ils ont été initialement développés par Szilder (1993), comme moyen d'estimation des propriétés de la glace comme la densité et la morphologie. La simulation de la formation de glaçons, qui a lieu de manière parfaitement naturelle, défie tous les modèles physiques améliorés avancés. Néanmoins la modélisation morphogénétique n'est pas capable de résoudre les équations physico-mathématiques du processus de givrage, y compris les conditions initiales et limites de ces équations. Par conséquent, les modélisateurs morphogénétiques préfèrent utiliser le terme «émulation» plutôt que «simulation» pour décrire les résultats de leur modélisation. Les résultats sont impressionnantes, Figures 10 et 11. Les fondements de l'approche morphogénétique sont des origines diverses, les automates cellulaires et les méthodes de particules discrètes en dynamique des fluides (Rivet et Boon 2001).



Figure 10 : Accumulation de glace sur un cylindre de diamètre 35mm, obtenue par la simulation d'un modèle morphogénétique, Lebatto et al. (2005). Conditions de simulation : intensité des précipitations 1mm/h, flux de chaleur externe 5W/m<sup>2</sup>, durée de l'accumulation 5h, diamètre du cylindre 35mm, paramètre du champ de congélation 2.



Figure 11 : Résultat de la simulation numérique d'un modèle morphogénétique d'accumulation de glace sur un isolateur de poste, Rudzinski et al. (2005). probabilité de congélation 0,001, paramètre de délestage 1000, paramètre de mouvement 1, paramètre du champ de congélation 5, quantité de précipitation 4mm, angle d'impact des gouttelettes par rapport à l'axe verticale 45°.

Plusieurs modèles morphogénétiques ont vu le jour, Szilder (1994), Chen et al. (2000). Les modèles cités ci-dessus ont deux points communs, ils sont en 2D et applicables au givrage d'objets de forme simple. Les résultats obtenus sont très intéressants. Mais une modélisation en 2D ne montre pas tous les détails de la forme de glace accumulée. Alors, Szilder et Lozowski (1994) élaborèrent un modèle 3D qui simule la formation de glaçons sur des surfaces planes et non sur des objets cylindriques. Sachant que l'accumulation de glace peut se produire sur des structures de forme complexe, Szilder et Lozowski (1995a) développèrent un modèle en 3D approprié. Rudzinski et al. (2005) mirent en œuvre un modèle morphogénétique en 3D qui prédit l'accumulation de glace sur un isolateur de poste de distribution d'énergie électrique hors tension.

En 2001, Szilder et Lozowski (1995b) élaborèrent un modèle morphogénétique d'accumulation de glace, due à une pluie verglaçante, sur les conducteurs de ligne de transport d'énergie. Dans ce modèle, les probabilités de mouvement horizontal dans chacune des quatre directions perpendiculaires et la probabilité d'un mouvement ascendant sont égales. Le ratio de la probabilité de déplacement vers le bas sur la probabilité de chacune des autres directions est défini comme le paramètre de mouvement. La valeur de ce paramètre est assimilée à la grandeur relative des forces de gravité, de tension de surface et de viscosité. Szilder et Lozowski (1995b) examinèrent l'influence du paramètre de mouvement sur la géométrie des stalactites de glace, et conclurent qu'une variation de ce paramètre oscillant entre 3 et 20 n'influencèrent pas de manière significative la géométrie des glaçons. Cependant, des valeurs plus élevées augmentent considérablement le temps

d'exécution du code du modèle. Par conséquent, la valeur 3 fut choisie comme magnitude valeur du paramètre de mouvement.

Szilder et Lozowski (1995b) définirent la probabilité de congélation par l'Équation (2.8).

$$P_c = \frac{\pi}{2} \frac{Q}{P \rho_e L_F} \frac{\Delta x}{R} P_m \quad (2.8)$$

Où  $P_c$  est la probabilité de congélation;  $Q$  (W/m<sup>2</sup>), la perte de chaleur vers l'air;  $P$  (m/s), l'intensité des précipitations;  $\rho_e$  (kg/m<sup>3</sup>), la densité de l'eau;  $L_F$  (J/kg), la chaleur latente de congélation de l'eau;  $\Delta x$  (m), l'arête d'une cellule du domaine de simulation;  $R$  (m), le rayon du cylindre; et  $P_m$ , le paramètre de mouvement.

La probabilité de congélation dépend, en plus des conditions atmosphériques, du rayon du cylindre nu. Elle demeure constante durant toute la simulation malgré le fait que l'accumulation de glace ne demeure pas cylindrique. Même si cette accumulation de glace avait une forme cylindrique, il aurait fallu faire varier  $R$  pendant la simulation. Ceci entraînerait la variation de la probabilité de congélation. Pour être réaliste, il faudrait que la probabilité de congélation soit explicitement indépendante de la forme cylindrique. Notons aussi que la probabilité de congélation et le paramètre de délestage qui gouverne l'égouttement sous l'accumulation de glace ne sont pas liés par une expression mathématique. Les pertes thermiques employées par Szilder et Lozowski (1995b) sont arbitraires. Les résultats de ce modèle sont partiellement comparés à des résultats de modèles analytiques. Néanmoins, nous suggérons qu'une validation passe avant tout par une comparaison avec des tests pratiques en laboratoire.

Le modèle morphogénétique de Szilder et Lozowski (1995b) n'est pas capable de simuler l'accumulation de glace sur un cylindre en rotation. La rotation du cylindre est une approximation de la torsion du cylindre recouvert de glace. Cette torsion est due au l'effet combiné des forces aérodynamiques et gravitationnelles. La flexibilité en torsion du câble a une influence sur la forme de l'accrétion de glace. Il devient alors intéressant d'intégrer cette flexibilité en torsion du câble dans le processus d'accrétion pour prédire une forme d'accumulation de glace réaliste. Notons que le domaine de simulation utilisé par Szilder et Lozowski (1995b) est réduit. Le domaine de simulation à trois dimensions est de 50mm(horizontal) × 30mm(horizontal) × 70mm(vertical). Comme ils le disent dans la conclusion de leurs travaux, il serait intéressant de faire des simulations numériques dans des domaines plus grands afin d'examiner l'influence du volume du domaine de simulation sur la morphologie et la masse de l'accumulation de glace.

Lebatto et al. (2004, 2005) élaborèrent un modèle morphogénétique, en 3D, d'accumulation de glace sur un cylindre fixe basé en partie sur le modèle de Szilder et Lozowski (1995b). Ce modèle fut aussi réalisé à partir de certaines hypothèses simplificatrices telles qu'un transfert de chaleur arbitraire et constant pendant le givrage. Une telle hypothèse a été utilisée dans tous les modèles morphogénétiques précédents, bien qu'en réalité la valeur de ce coefficient soit locale, parfois différente d'un point à un autre et variant dans le temps. Ces coefficients de transfert locaux jouent un rôle important dans le processus de givrage. Dans les modèles morphogénétiques en 3D existants, l'influence du vent n'a pas été considérée dans les échanges thermiques à la surface de la structure soumise au givrage. Pourtant, les câbles aériens sont souvent soumis au vent durant les

tempêtes de verglas. Contrairement au modèle de Szilder et Lozowski (1995b), les simulations numériques du modèle de Lebatto et al. (2005) ont été exécutées dans un domaine plus large, soit 150 mm (horizontal)  $\times$  200 mm (horizontal)  $\times$  200 mm (vertical). Une comparaison des résultats des deux modèles, en vue d'examiner l'influence de la taille du domaine de simulation sur le processus d'accumulation de glace, n'a pas été réalisée. Cela fut motivé par le fait que le paramètre de délestage utilisé dans le modèle de Lebatto et al. (2005) est arbitraire et constant durant tout le processus, contrairement au modèle de Szilder et Lozowski (1995b) qui utilise un paramètre de délestage calculé et variant avec la longueur des glaçons. Le modèle de Lebatto et al. (2005) tient compte de la flexibilité du conducteur, ce qui n'est pas le cas pour le modèle de Szilder et Lozowski (1995b). Les modèles de Lebatto et al. (2005) et Szilder et Lozowski (1995b) diffèrent aussi au niveau des probabilités de mouvement dans chacune des directions. La différence majeure est que tout déplacement vers le haut d'une particule liquide est proscrit dans le modèle de Lebatto et al. (2005) mais permis dans le modèle de Szilder et Lozowski (1995b).

Le présent projet de recherche fut initié en vue d'améliorer le modèle de Lebatto et al. (2005) afin de faire face à certains manquements des modèles énumérés dans cette section. Cela est réalisé en vue de rendre la simulation de l'accumulation de glace la plus réaliste possible. Autrement dit, se rapprocher de la réalité. Il est nécessaire de prendre en compte les facteurs cités ci-dessus afin de tenter d'émuler le plus fidèlement possible la morphologie et la masse de l'accumulation de glace.

## CHAPITRE III

### MODÈLE NUMÉRIQUE

La modélisation numérique est une approche adéquate à la prédiction de la masse et de la forme de l'accumulation de glace. Elle offre la possibilité de prendre en compte plusieurs détails physiques du phénomène de givrage et d'en dégager les interactions. L'avènement des ordinateurs et des environnements de développement informatiques modernes offrent de nouvelles perspectives pour la modélisation et la simulation du givrage atmosphérique des équipements des réseaux électriques. Trois types de modèles sont utilisés : les modèles continus (résolution des équations de conservation de masse et de quantité de mouvement), les modèles de cheminement aléatoire (ou Random Walk en anglais) et les modèles basés sur les réseaux de neurones. Les modèles continus se prêtent mieux à la prédiction de l'accumulation de glace sur des objets à géométrie simple, comme un cylindre. Les modèles de cheminement aléatoire ne sont pas limités par la complexité géométrique. Quant aux modèles de réseaux de neurones, ils sont majoritairement utilisés pour la prédiction de l'accumulation de glace sur les structures à partir d'une série chronologique de données météorologiques.

La plupart des modèles continus ne prennent pas en compte la formation de glaçons dans le processus d'accumulation. Lorsque c'est le cas, la formation de glaçons se fait indépendamment du processus global de givrage, (Makkonen, 1998). Quant aux modèles

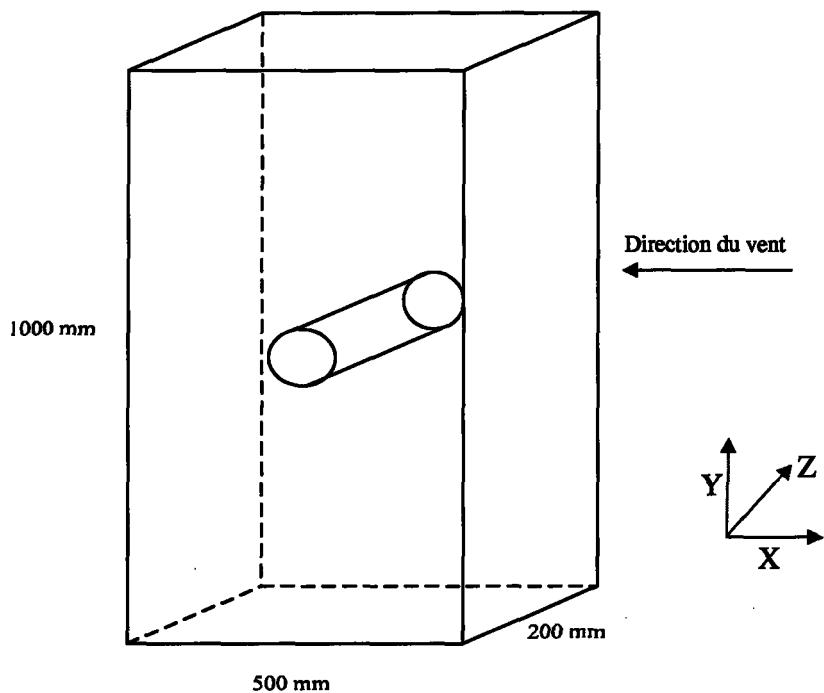
de réseaux de neurones, ils ne donnent pas de détails sur la forme de l'accrétion de glace. L'avantage des modèles de cheminement aléatoire, appelés aussi morphogénétiques, est leur habileté à simuler la formation de glaçons dont le rôle dans l'intensité du givrage s'est avéré important. En effet, les glaçons augmentent la surface de capture des précipitations, entraînant ainsi une augmentation de la charge totale de glace. Le modèle numérique issu de ce travail est basé sur la méthode du cheminement aléatoire. Cette méthode consiste à émuler le cheminement aléatoire de particules liquides issues d'une discrétisation de la pluie verglaçante en gouttelettes d'eau dont le volume après congélation est égal à  $1\text{mm}^3$ .

Le domaine numérique de l'accumulation est défini par un parallélogramme de  $200\text{mm} \times 500\text{mm} \times 1000\text{mm}$  présenté à la Figure 12. Le domaine est subdivisé en plusieurs cubes d'arête de 1mm, soit un total de  $10^8$  cellules cubiques. La trajectoire de chaque particule liquide s'amorce à partir d'une position choisie aléatoirement dans le plan horizontal supérieur du domaine de simulation.

Chaque particule liquide décrit un déplacement rectiligne jusqu'à ce qu'elle rentre en collision avec un élément de cylindre ou de glace. Suite à son impact, elle amorce un cheminement aléatoire sur la surface de l'ensemble de la structure. Par ailleurs, les lois qui gouvernent son cheminement aléatoire sont énoncées dans les sections subséquentes. La trajectoire des gouttelettes est calculée à partir de l'angle d'impact obtenu expérimentalement. Lorsque la trajectoire des gouttelettes débute sur le plan horizontal supérieur, celle-ci est une droite qui, par rapport au plan vertical, décrit un angle égal à l'angle d'impact obtenu expérimentalement.

Le point de départ de la trajectoire de chaque gouttelette se fait au moyen de la génération d'une séquence pseudo-aléatoire de nombres. Cette génération suit une loi uniforme. Cette technique a pour objectif de simuler une distribution uniforme des précipitations verglaçantes sur toute la longueur du cylindre. Les particules sont libérées l'une après l'autre. Lorsqu'une particule est interceptée par le cylindre givré, un autre nombre aléatoire est généré pour déterminer le prochain comportement de son cheminement. Les directions sont définies par rapport à une observation dans le sens positif de l'axe Z. La particule possède sept possibilités dans son cheminement aléatoire, à savoir, se déplacer i) vers la gauche ; ii) vers la droite ; iii) en aval ; iv) en amont ; v) vers le bas ; vi) geler ; vii) ou quitter la structure de glace. En cas de congélation, la cellule vide qui reçoit la particule gelée, est une cellule choisie aléatoirement, suivant une loi uniforme, parmi les cellules adjacentes qui possèdent le plus de cellules voisines occupées par une particule de glace ou de cylindre. Cette recherche se fait dans un volume cubique dont le centre est la cellule courante. Le cube a une arête de  $2n_C + 1$  où  $n_C$  est égal à 2.  $n_C$ , est appelé «paramètre du champ de congélation».

La valeur 2 donne des résultats probants pour une simulation en trois dimensions, c'est-à-dire une accumulation de glace compacte dépourvue de grands espaces vides. Cela a été démontré par Szilder et Lozowski (1994). La technique présentée par Szilder (1994), et utilisée pour déterminer la cellule réceptrice de la particule gelée, a pour objectif, de simuler l'effet des forces de tension de surface qui tendent à assurer une cohésion entre les molécules d'eau.



**Figure 12 : Représentation schématique du domaine simulation**

En plus du paramètre du champ de congélation, le modèle morphogénétique utilise deux autres éléments dans la détermination de l'issue du cheminement aléatoire, à savoir la probabilité de congélation et le paramètre de délestage. L'issue du cheminement de chaque particule liquide est régie par la probabilité de congélation et le paramètre de délestage. Autrement dit, le cheminement des particules d'eau prend fin dès leur congélation ou leur délestage.

La probabilité de congélation définit la probabilité qu'une particule d'eau liquide gèle dans une cellule particulière à la surface du cylindre givré. La particule gèle lorsque le

nombre aléatoire généré est inclus dans l'intervalle associé à la probabilité de congélation. Quant au paramètre de délestage, il émule le comportement de la masse d'eau pendante sous le cylindre au cours du processus de givrage. La particule abandonne le cylindre givré lorsqu'elle ne gèle pas à l'une des extrémités inférieures de l'accumulation de glace pendant un période de temps supérieure au paramètre de délestage. Il est interdit qu'une particule quitte la surface du cylindre givré, à moins que le délestage se fasse selon la technique expliquée précédemment. Le phénomène d'éclaboussure n'est pas considéré. Par conséquent, le coefficient de collision des gouttelettes est égal à 1. L'organigramme du code numérique est présenté à l'Annexe A.

Considérant le caractère stochastique de la méthode du cheminement aléatoire, le code numérique a été exécuté cinq fois en générant des séquences différentes de nombres pseudo-aléatoires (tout en gardant à l'esprit que les conditions atmosphériques en entrée demeurent les mêmes pour chaque série d'exécutions). Autrement dit, l'argument du générateur de nombres pseudo aléatoires est différent pour chaque simulation. Le préfixe «pseudo» s'explique par le fait que la séquence de nombres générés demeure identique pour un même argument du générateur. Par conséquent, pour obtenir une séquence différente de nombres aléatoires pour chaque exécution, différents arguments ont été choisis. Une moyenne et un écart-type des données de sorties sont calculés. Cette façon de faire permet de tenir compte de l'écart qui existe entre les résultats pour les mêmes conditions atmosphériques. L'accrétion de glace sur le cylindre diffère «légèrement» du point de vue de la masse et/ou de la forme, pour chacune des exécutions. En effet, cette façon de faire est logique dans la mesure où pour les mêmes conditions atmosphériques, les

glaces accumulées à des instants distincts sur une structure diffèrent «légèrement» du point de vue de la masse et/ou de la forme de l'accumulation de glace.

Le modèle morphogénétique est basé sur la génération uniforme de nombres réels compris entre 0 et 1. Le générateur de nombres aléatoires utilisé dans ce travail utilise la théorie de Mersenne Twister présenté par Matsumoto et Nishmura (1998). Il est capable de générer en une seconde, plus de 10 millions de nombres réels aléatoires avec un processeur qui possède une vitesse d'exécution de 1GHz. Le générateur de nombres aléatoires possède une résolution de 32 bits et prend un entier comme argument. Un entier produit la même séquence de nombres réels. Comme mentionné précédemment, différents entiers seront utilisés pour chacune des cinq simulations. Les conditions atmosphériques demeurent constantes pour les cinq simulations.

Plusieurs ordinateurs du WESTGRID ont été utilisés pour faire de nombreuses exécutions simultanées du modèle numérique. En effet, la répétitivité des simulations numériques et la limite de temps impari à ce projet de recherche, ont favorisé ce choix. WESTGRID est réseaux d'ordinateurs et de clusters d'ordinateurs, géographiquement distants et localisés dans sept institutions de l'Ouest canadien (Simon Fraser University ; The Banff Centre ; TRIUMF ; University of Alberta ; University of British Columbia ; University of Calgary ; University of Lethbridge). Le code informatique est développé en C++. Les formes de l'accumulation de glace sont visualisées au moyen du logiciel MayaVi. Il s'agit d'un logiciel «Open Source» développé par Prabhu (2001).

### 3.1 Probabilité de congélation

Considérons un ensemble de particules liquides ayant un parcours vertical, de la partie supérieure de l'accrétion de glace jusqu'à sa partie inférieure. Soit,  $P_c$ , la probabilité de congélation (identique pour chacune des particules), et  $N_{in}$ , le nombre de particules libérées. Soit,  $k$ , le nombre de fois que l'une des particules libérées ne gèle pas durant son cheminement. Le nombre moyen de particules qui arrivent à la partie inférieure de la structure, sans geler, est défini par l'Équation (3.1). La probabilité qu'une particule ne gèle pas est égale à  $1-P_c$ .

$$N_{out} = N_{in} (1 - P_c)^k \quad (3.1)$$

Le nombre de particules liquides gelées se déduit de l'Équation (3.1).

$$N_c = N_{in} (1 - (1 - P_c)^k) \quad (3.2)$$

Dans le modèle numérique,  $k$  est défini, comme étant la moitié de la distance entre la droite horizontale passant par le sommet et celle passant par la base de l'accumulation de glace. Les gouttelettes d'eau sont interceptées le long de toute la section verticale de l'accrétion. Par conséquent les gouttelettes non gelées qui atteignent le bas de l'accumulation parcourent en moyenne la moitié de section verticale de l'accrétion suivant l'axe Y, voir Figure 12.

La fraction de gouttelettes gelées est égale au rapport de la perte de chaleur vers l'air,  $Q(W/m^2)$ , sur la quantité de chaleur latente fournie par les précipitations verglaçantes. Cette quantité de chaleur varie d'un point à l'autre de la surface de l'accrétion de glace. Cette

perte de chaleur vers l'air est approximée plus loin dans ce document par une valeur moyenne constante. Précisons que  $P\rho_e$  est une approximation du flux de précipitation réellement interceptée par le cylindre givré, car ce flux varie d'un endroit à l'autre de la surface du cylindre givré.

$$\frac{N_c}{N_{in}} = \frac{Q}{P\rho_e L_F} \quad (3.3)$$

Avec  $P$  (m/s), l'intensité des précipitations,  $\rho_e$  (kg/m<sup>3</sup>), la densité de l'eau et  $L_F$  (J/kg), la chaleur latente de congélation de l'eau. En remplaçant  $N_c$  par son expression,

$$1 - (1 - P_c)^k = \frac{Q}{P\rho_e L_F} \quad (3.4)$$

Par conséquent,

$$P_c = 1 - \left(1 - \frac{Q}{P\rho_e L_F}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (3.5)$$

L'Équation (3.5) montre que la probabilité de congélation est une fonction des conditions atmosphériques représentées par les pertes thermiques et l'intensité des précipitations verglaçantes. La probabilité de congélation prend la valeur 0 lorsque  $Q$  est égal à zéro. Si le dénominateur du terme de droite de l'Équation (3.3) a la même valeur que  $Q$  alors la probabilité de congélation est égale à 1, sinon, si  $Q$  est supérieur au dénominateur du terme de droite (condition qui pourrait se produire dans la nature lors de la formation de givre), alors la valeur de  $Q$  est "forcée" à prendre la valeur dénominateur du terme de droite dans la mesure où une probabilité ne peut être supérieure à un.

Il faut noter que la probabilité de congélation est aussi exprimée en fonction de  $k$ , que l'on pourrait définir comme un "facteur de forme". Cette dépendance est intéressante car les dimensions d'un objet cylindrique soumis au givrage et la forme de l'ensemble de la structure glacée jouent un rôle important durant le processus de givrage. Cette forme influence le nombre de gouttelettes d'eau en surfusion, interceptés, affectant ainsi l'intensité du givrage. Un aspect très important à noter est la variation du facteur  $k$ . Durant le processus de givrage, l'accumulation de glace prend des formes diverses avant d'atteindre une forme finale. Cette variation de forme au cours du processus est exprimée par la variation de  $k$ , qui affecte la probabilité de congélation. Cette approche est particulièrement intéressante car elle semble proche de la réalité. Le facteur  $k$  est recalculé à chaque fois qu'une particule est libérée.

### 3.2. Transferts thermiques

Le processus physique qui se déroule à la surface du cylindre givré, est gouverné par son bilan thermique. Le flux de chaleur,  $Q$  ( $\text{W/m}^2$ ), est le résultat de la somme des flux de chaleurs suivants :

- d'évaporation,  $Q_{EV}$  ( $\text{W/m}^2$ );
- de convection engendrée par le mouvement de l'air  $Q_C$  ( $\text{W/m}^2$ );
- échangée entre les gouttelettes interceptées et la glace sous-jacente,  $Q_G$  ( $\text{W/m}^2$ );
- de radiation  $Q_R$  ( $\text{W/m}^2$ );
- de réchauffement aérodynamique,  $Q_V$  ( $\text{W/m}^2$ ).

Cette assertion est traduite par l'Équation (3.6) :

$$Q = Q_{EV} + Q_C + Q_G + Q_R + Q_V \quad (3.6)$$

Toutefois,  $Q_{EV}$ ,  $Q_C$  et  $Q_G$  sont les pertes de chaleur les plus importantes pour les conditions de pluies verglaçantes, (Szilder, 2003). Les pertes par effet Joule affectent seulement l'intensité du givrage dans les premiers instants du processus et perdent leur importance lorsque le cylindre est entièrement recouvert de glace. Toutefois, elles peuvent causer la fonte de la glace à l'interface cylindre/glace. En effet, les conductivités thermiques de l'eau (0,55W/m/K à 0 °C) et de la glace (2,1W/m/K à 0 °C) sont faibles. L'Équation (3.6) est alors réduite à l'Équation (3.7):

$$Q = Q_{EV} + Q_C + Q_G \quad (3.7)$$

Dans un souci de simplification, les pertes de chaleur à la surface du cylindre givré ont été évaluées à la température de congélation de l'eau (0°C). Cette hypothèse est raisonnable pour les pluies verglaçantes dans la mesure où dans un tel cas la surface de la glace est toujours humide. Il faut préciser que,  $Q$  n'a pas la même magnitude sur toute la surface de l'accrétion de glace. Dans un souci de simplification il sera estimé par une perte de chaleur moyenne.

### 3.2.1. Perte de chaleur par convection

La perte de chaleur par convection est induite par le contact de l'air en mouvement et de la surface du cylindre givré. Elle est définie par la loi de refroidissement de Newton, Eyglunent (1997).

$$Q_C = h_c (T_s - T_a) \quad (3.8)$$

Avec  $h_C$  (W/m<sup>2</sup>/K), le coefficient de transfert de chaleur par convection;  $T_s$ (K), la température à la surface du cylindre évaluée à la température de congélation de l'eau (0°C);  $T_a$ (K), la température de l'air ambiant. La température des gouttelettes d'eau est supposée égale à  $T_a$ . Le coefficient de transfert thermique est un élément essentiel dans le processus d'accumulation de glace. Malheureusement, son approche théorique est ardue. Il existe néanmoins des méthodes pour l'estimer comme le fit Fu (2004) au moyen de la méthode de couche limite. Cette méthode est difficile à mettre en œuvre lorsqu'il y a formation de glaçons. En pratique, il est estimé à partir de corrélations expérimentales existantes. Le coefficient de transfert thermique du cylindre est différent de celui des glaçons. Cependant,  $h_C$  a été utilisé sur toute l'accrétion pour simplifier le modèle. L'Équation (3.9) donne l'expression de  $h_C$ .

$$h_C = \frac{Nu k_a}{d_c} \quad (3.9)$$

Où  $Nu$ , est le nombre Nusselt;  $k_a$  (W/m/K), la conductivité thermique de l'air; et  $d_C$ (m), le diamètre du cylindre. L'accumulation de glace n'a pas une forme parfaitement cylindrique au cours du processus d'accumulation. Dans l'optique de faciliter le calcul d'un coefficient moyen une forme cylindrique est admise. L'estimation de la conductivité thermique peut se faire par la corrélation empirique de Sutherland (Fortin 2002).

$$k_a = k_{ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^{3/2} \cdot \frac{T_{ref} + S}{T + S} \quad (3.10)$$

L'indice *ref* fait référence à la valeur de la grandeur prise à une température de référence.  $k_{ref}$  est la conductivité thermique de l'air à 10°C, 0,02415 W/m/K;  $S$  est la constante de Sutherland, 194,44 K. Quant au nombre de Nusselt, il est calculé à partir des travaux d'Hilpert (Eyglunent, 1997). Ce dernier recommande d'employer la corrélation définissant le nombre de Nusselt comme une fonction du nombre de Reynolds.

$$Nu = A Re^m \quad (3.11)$$

Les coefficients  $A$  et  $m$  sont présentés au Tableau 3. Le nombre de Reynolds,  $Re$ , est déterminé par l'Équation (3.12):

$$Re = \frac{d_c}{\nu_a} V_v = d_c \frac{\rho_a}{\mu_a} V_v \quad (3.12)$$

Où  $V_v$ (m/s), est la vitesse du vent;  $d_c$ (m), le diamètre du cylindre;  $\nu_a$ (m<sup>2</sup>/s), la viscosité cinétique de l'air;  $\rho_a$ (kg/m<sup>3</sup>), la densité de l'air et  $\mu_a$ (Pa.s), la viscosité dynamique de l'air.

$Re$	$A$	$m$
1 – 4	0.891	0.330
4 – 40	0.821	0.385
$40 – 4.10^3$	0.615	0.466
$40.10^3 – 4.10^4$	0.174	0.618
$40.10^4 – 4.10^5$	0.024	0.805

Tableau 3 : Coefficients  $A$  et  $m$  en fonction du nombre de Reynolds pour un cylindre<sup>6</sup>

La corrélation empirique de Clift, peut être utilisée pour le calcul de la viscosité dynamique de l'air  $\mu_a$  à une température donnée, (Fortin 2002).

<sup>6</sup> Eyglunent, B., 1997, "Manuel de thermique, théorie et pratique", 2e édition, Éditions HERMES, Paris, pp. 147-148.

$$\mu_a = \mu_{ref} \cdot \frac{T^{1.5}}{T + 120} \quad (3.13)$$

$\mu_{ref}$ , est la viscosité dynamique de référence pour l'air,  $1,4964 \cdot 10^{-5}$  Pa.s;  $T$ , est la température à laquelle est évaluée la viscosité dynamique.

### 3.2.2. Perte de chaleur par évaporation

La perte de chaleur par évaporation est évaluée par (Szilder et Lozowski, 2003) :

$$Q_E = h_c \left( \frac{Pr}{Sc} \right)^{0.63} \frac{\varepsilon L_v}{p C_p} (e_s - e_A) \quad (3.14)$$

avec  $Pr$ , le nombre Prandtl;  $Sc$ , le nombre Schmidt;  $\varepsilon$ , le rapport de mélange entre la vapeur d'eau et l'air est égal à 0,622 (rapport entre la masse moléculaire de la vapeur d'eau, 18,01g/mole et de l'air sec, 28,97g/mole);  $L_v$  (J/kg), la chaleur latente de vaporisation;  $p$ (Pa), la pression statique de l'air;  $C_p$ (J/kg/K), la capacité calorifique de l'air;  $e_s$  et  $e_A$ (Pa) désignent la pression de vapeur saturée aux températures  $T_s$  et  $T_a$ , respectivement.

Le nombre de Prandtl de l'air est le rapport de la viscosité cinématique,  $\nu$ (m<sup>2</sup>/s) sur le coefficient de diffusion thermique,  $\alpha$  (m<sup>2</sup>/s), Fortin (2002).

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu_a}{\rho_a \alpha} \quad (3.15)$$

$$\text{Où, } \alpha = \frac{k_a}{\rho_a \cdot C_p} \quad (3.16)$$

Avec  $\rho_a$  (kg/m<sup>3</sup>), la densité de l'air;  $C_p$  (J/kg/K), la capacité calorifique de l'air. Le nombre de Schmidt  $Sc$  s'exprime ainsi, (Fortin 2002).

$$Sc = \frac{\nu_a}{D_{va}} \quad (3.17)$$

Où  $D_{va}$  (m<sup>2</sup>/s) est le coefficient de diffusion de vapeur d'eau dans l'air, et calculé à la frontière de la couche limite, Fortin (2002).

$$D_{va} = D_{ref} \left( \frac{P_{ref}}{P} \right) \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3.18)$$

Où  $D_{ref}$  est le coefficient de diffusion de vapeur dans l'air à 20°C, à une pression de 101,3kPa,  $2,282 \times 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s. La pression de vapeur saturée à une température  $T$  (K) donnée est calculée avec l'équation de Dolganov, Fortin (2002).

$$e_{vsat} = e_{vsat}(T_{ref}) e^{\frac{L_v}{R_v} \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \quad (3.19)$$

Où  $T_{ref}$  est la température de référence, 0°C et  $R_v$  (J/kg/K), la constante de gaz parfait de la vapeur d'eau.

### 3.2.3. Flux de chaleur entre les gouttelettes interceptées et la glace sous-jacente.

Elle est définie par :

$$Q_G = m_E C_E (T_s - T_a) \quad (3.20)$$

Où  $C_E$  (J/kg/K), est la chaleur spécifique de l'eau,  $m_E$  (kg/m<sup>2</sup>/s), le flux massique de l'eau interceptée. Le flux massique de l'eau interceptée est différent d'un endroit à l'autre de la surface du cylindre recouvert de glace. Autrement dit, il n'est pas uniforme sur toute

la surface. En effet, toute la surface n'est pas directement heurtée par les particules liquides. Certains endroits sont atteints par le ruissellement du film d'eau non gelée à la surface du cylindre recouvert de glace. Le flux massique de l'eau interceptée est exprimé par l'Équation (3.21).

$$m_E = (P_{Int}/P_{lib}) \cdot P \cdot \rho_e \quad (3.21)$$

Où  $P_{Int}$  est le nombre de particules liquides interceptées par l'ensemble de la structure ;  $P_{lib}$  est le nombre total de particules liquides libérées au cours de la simulation numérique ;  $P$ (m/s) est l'intensité des précipitations ; et  $\rho_e$  (kg/m<sup>3</sup>) est la densité de l'eau. Le rapport  $(P_{Int}/P_{lib})$  peut être nommé "facteur de ruissellement". Ce facteur est fortement dépendant de la taille du domaine par le biais de  $P_{lib}$ . Ce facteur est proche de zéro. Par conséquent, la contribution de  $Q_G$  est négligeable dans les pertes thermiques comparativement aux pertes convectives et évaporatoires. En effet,  $Q_G$  dépend de  $m_E$  tel que présenté à l'Équation.

### 3.3. Paramètre de délestage

Le paramètre de délestage émule le comportement de la masse d'eau pendante sous la structure de glace. Cette masse d'eau pendante se forme durant une période de temps,  $t_D$ (s). Après avoir atteint une valeur critique,  $M_{cr}$  (kg/m), elle se libère de l'accumulation. Considérant que cette masse d'eau pendante d'eau s'étale sur  $\Delta l$  (0,001m) le long du cylindre recouvert de glace, le bilan massique par unité de longueur est exprimé par l'Équation (3.22).

$$\frac{1}{\Delta l} \int_0^{M_{cr}} dM = \int_0^{t_D} m_s dt \quad (3.22)$$

Avec  $m_s$  (kg/m<sup>2</sup>/s), le flux massique sous le cylindre est défini comme suit :

$$m_s = (1 - P_c)^k P \cdot \rho_e \quad (3.23)$$

L'intégration de l'Équation (3.22) combinée à l'Équation (3.23) permet de définir  $M_{cr}$ .

$$M_{cr} = t_D \Delta l \cdot P \cdot \rho_e \cdot (1 - P_c)^k \quad (3.24)$$

Cette masse critique a été estimée à  $3,2 \cdot 10^{-3}$  kg/m par Makkonen et Fujii (1993). La période de formation de la masse critique d'eau pendant sous la structure de glace est :

$$t_D = \frac{M_{cr}}{\Delta l \cdot P \cdot \rho_e \cdot (1 - P_c)^k} \quad (3.25)$$

La masse d'eau pendante est approvisionnée de chaque côté de la ligne de stagnation. Les quantités d'eau qui approvisionnent les masses d'eau pendantes proviennent de part et d'autre de la ligne de stagnation. Ces quantités d'eau sont égales pour une pluie verglaçante dont la direction de la chute est parallèle à la ligne de stagnation, Szilder (1993). Étant donné, que les masses d'eau pendantes se forment à des endroits bien définis et durant une période de temps donnée, le flux massique de cette masse d'eau pendante est indépendant du temps. Cela signifie que le temps moyen qu'une particule liquide à l'extrémité inférieure de l'accumulation de glace demeure comme partie de cette masse d'eau pendante, est la moitié du temps de formation de la masse critique.

Au cas où la trajectoire des gouttelettes n'est pas verticale, les quantités d'eau alimentant la masse d'eau pendante de part et d'autre de la ligne de stagnation ne sont pas identiques. Compte tenu de la difficulté de faire une répartition adéquate de l'apport de ces quantités

d'eau, l'approche de Szilder (1993) pour une chute verticale de pluie verglaçante a été employée. Par conséquent, le paramètre de délestage,  $P_D$  est le rapport de la moitié de la période de formation de la masse critique de l'eau pendante et du pas de temps du modèle,  $\Delta t$ .

$$P_D = \frac{0.5t_D}{\Delta t} \quad (3.26)$$

Où  $\Delta t$  est le pas de temps estimé par Szilder (1994) dans son modèle numérique en supposant une vitesse de particules liquides à la surface de l'accrétion de l'ordre de 10mm/s. L'arête d'une cellule étant de 1mm, le pas de temps est égal à 0,1s. La combinaison des Équations (3.25) et (3.26) permet de déterminer le paramètre de délestage en fonction des conditions atmosphériques et de la "forme" de la glace accumulée.

$$P_D = \frac{0.5M_{cr}}{P \cdot \rho_e \cdot \Delta t \cdot \Delta l \cdot (1 - P_c)^k} \quad (3.27)$$

L'expression du paramètre de délestage dénote la particularité de ce modèle morphogénétique. Le paramètre de délestage est directement exprimé en fonction de la probabilité de congélation. Il est inversement proportionnel à l'intensité des précipitations. Ces deux observations dénotent une cohérence de l'expression du paramètre de délestage. Ce dernier est également exprimé en fonction des conditions atmosphériques et du «facteur de forme»,  $k$ . Le paramètre de délestage augmente avec  $k$ . Des valeurs élevées de  $P_D$  dénotent un égouttement lent. Une augmentation de  $k$  indique une augmentation de la longueur des glaçons. La relation qui existe entre  $P_D$  et  $k$  est en accord avec les observations pratiques. En effet, lorsque les glaçons s'allongent, les gouttelettes provenant

de la partie supérieure de l'accumulation de glace doivent parcourir une distance plus grande avant d'atteindre la partie inférieure du cylindre recouvert de glace. Cela a pour conséquence de retarder le délestage.

### 3.4. Probabilités de mouvement

Dans cette section, il s'est agit de déterminer la probabilité qu'une particule liquide se déplace i) vers la gauche( $P_{XG}$ ) ; ii) vers la droite( $P_{XD}$ ) ; iii) en aval( $P_{ZAV}$ ) ; iv) en amont( $P_{ZAR}$ ) ; v) et vers le bas( $P_{YB}$ ). Le déplacement d'une particule liquide dans la cellule supérieure adjacente à la cellule courante est prohibé. Les directions des déplacements éventuels sont présentées à la Figure 13.

En vue de déterminer les différentes probabilités, des hypothèses ont été adoptées et écrites sous formes d'équations mathématiques. La somme de toutes les probabilités, y compris la probabilité de congélation, est égale à 1.

$$P_c + P_{XG} + P_{XD} + P_{ZAR} + P_{ZAV} + P_{YB} = 1 \quad (3.28)$$

Considérons dans un premier temps que l'accumulation de glace se déroule en absence de vent, sur un cylindre dont l'angle d'inclinaison est nul, à savoir que l'axe du cylindre est parallèle au plan défini par les axes X et Z. Dans ce cas ci, les probabilités qu'une particule se déplace dans l'une des cellules libres adjacentes à la cellule courante sont égales. Elles sont égales au cinquième de la différence de 1 et la probabilité de congélation. Cette probabilité est identifiée par  $P_{GN}$ .

$$P_{GN} = \frac{1 - P_c}{5} \quad (3.29)$$

L'éclaboussure des gouttelettes d'eau au moment de leur impact sur le cylindre givré n'est pas prise en compte. Les pluies verglaçantes sont toujours accompagnées de vents qui influencent la trajectoire des gouttelettes d'eau en surfusion dans leur chute. Cet effet du vent est alors incorporé au modèle en vue d'en déterminer l'influence sur la morphologie et la masse de glace accumulée. En présence de vent de faible vitesse, les gouttelettes en surfusion tombent verticalement sur le cylindre recouvert ou non de glace. En présence de vent modéré ou plus fort, les gouttelettes d'eau heurtent le cylindre givré selon une trajectoire oblique définie par un angle communément appelé «angle d'impact». Cet angle est déterminé expérimentalement ou calculé théoriquement à partir du rapport de la vitesse terminale des gouttelettes d'eau en suffusion et de la vitesse du vent. L'angle d'impact des gouttelettes  $\Phi$ , présenté à la Figure 14, se base sur les travaux de Jones (1996a).

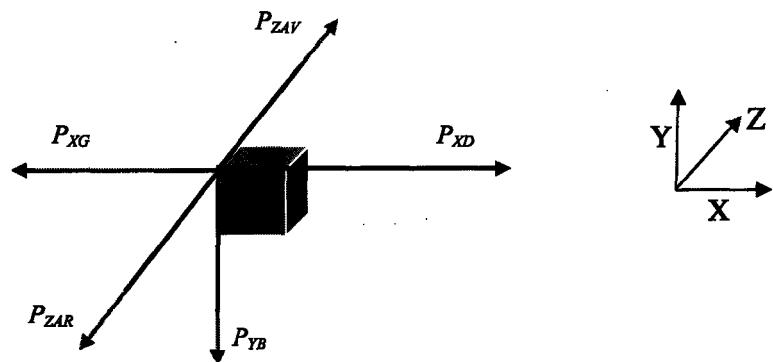


Figure 13 : Probabilités de déplacement d'une particule dans chaque direction. L'axe du cylindre est colinéaire à l'axe Z.

$V_T$  (m/s) est la vitesse terminale des gouttelettes;  $V_V$  (m/s), la composante horizontale du vent; et  $V_G$  (m/s), la vitesse d'impact des gouttelettes.

Gardons à l'esprit que la direction et la vitesse du vent peuvent varier durant les pluies verglaçantes. Cela entraîne la variation de l'angle d'impact des gouttelettes d'eau. Notons qu'il existe une gamme de tailles des gouttelettes pour les pluies verglaçantes. Chaque taille possède une vitesse terminale propre qui varie approximativement avec la racine carré du diamètre des gouttelettes. Lorsque l'angle d'impact des gouttelettes est calculé, il demeure constant durant la simulation numérique afin de simplifier le modèle.

En réalité, les conducteurs de lignes électriques ne sont pas situés dans un plan horizontal. Cela est occasionné par les forces gravitationnelles terrestres et la flexibilité des brins qui composent les conducteurs. Cette flexibilité est prise en compte dans le modèle morphogénétique, afin d'examiner son influence sur le processus d'accumulation de glace. La Figure 15 montre une représentation schématique d'une portée de ligne de transmission d'énergie électrique. Nous observons une courbure du conducteur de ligne en forme de chaînette. Pour diminuer la flèche du conducteur avec l'objectif de réduire ses oscillations sous l'action du vent, il est nécessaire d'exercer une tension en l'étirant, Avril (1974). Le conducteur prend alors une flèche d'autant plus faible que la tension mécanique exercée sur le conducteur est forte et que la distance entre les pylônes est faible. Mais il ne faut pas dépasser un certain effort sous peine de voir le fil se rompre. En général, la tension maximale est limitée au 1/4 de la résistance de rupture du matériau employé, Avril(1974).

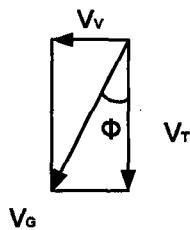


Figure 14 : Angle et vitesse d'impact des gouttelettes d'eau, Jones (1996a)

La contrainte maximale admissible prise en compte dans les calculs des lignes laisse une marge pour tenir compte des effets du vent et de la glace. En général, cette contrainte ne protège pas contre les accumulations excessives de glace accompagnées de vent. La flèche varie aussi avec la température du conducteur. La variation de la température des conducteurs d'une ligne en service dépend en grande partie de la valeur du courant qui les traverse et de la température ambiante. La température du conducteur et sa variation en fonction du courant de service ne sont pas considérées dans ce travail.

Une approche simple est employée par le modèle pour tenir compte de la flexibilité du conducteur de ligne. La flexibilité est définie par l'angle  $\beta$ . Il est défini par la tangente à la courbe décrite par le conducteur de ligne avec l'axe des pylônes, voir la Figure 15.

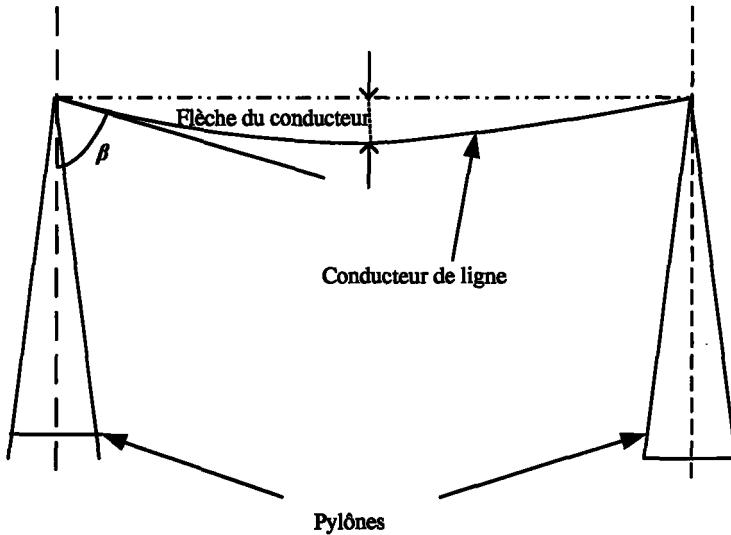


Figure 15 : Flexibilité du conducteur de ligne représentée par l'angle  $\beta$

Le cylindre n'est pas redessiné dans le domaine numérique au cours des simulations. L'inclinaison du cylindre sera prise en compte par une modification des probabilités de mouvements sur certains axes, à savoir les axes Z (axe suivant lequel se fait l'inclinaison) et Y. Par conséquent, la probabilité  $P_{GN}$  se décompose en deux composantes, l'une suivant l'axe Z et l'autre suivant l'axe Y.

$$P_{GN} = \sqrt{P_{GNZ}^2 + P_{GNY}^2} \quad (3.30)$$

Avec,

$$P_{GNZ} = P_{GN} \sin(90 - \beta) \quad (3.31)$$

$$P_{GNY} = P_{GN} \cos(90 - \beta) \quad (3.32)$$

Posons,

$$P_{yb} = P_{GNY} \quad (3.33)$$

$$P_{GNZ} = P_{ZAV} - P_{ZAR} \quad (3.34)$$

Le vent se déplace suivant l'axe X de la droite vers la gauche comme représenté à la Figure 14. Le vent ne change pas de sens et de direction pendant le givrage. Les Figures 13 et 14 permettent d'établir une relation entre les probabilités de mouvement et l'angle d'impact des gouttelettes.

$$\frac{P_{xG} - P_{xD}}{P_{yb}} = \frac{V_r}{V_t} = \tan \phi \quad (3.35)$$

En considérant l'inclinaison du cylindre, l'Équation (3.35) devient :

$$\frac{P_{xG} - P_{xD}}{P_{yb}} = \frac{V_r}{V_t \cos(90 - \beta)} = \tan \phi \quad (3.36)$$

Les différentes hypothèses sont regroupées sous forme d'un système d'équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_c + P_{xG} + P_{xD} + P_{ZAR} + P_{ZAV} + P_{yb} = 1 \\ P_{yb} = P_{GN} \cos(90 - \beta) \\ P_{ZAV} - P_{ZAR} = P_{GN} \sin(90 - \beta) \\ \frac{P_{xG} - P_{xD}}{P_{yb}} = \frac{V_r}{V_t \cos(90 - \beta)} \\ P_{xG} + P_{xD} - P_{ZAR} - P_{ZAV} = 0 \end{array} \right. \quad (3.37)$$

La résolution de ce système d'équations donne les résultats suivants :

$$P_{TB} = P_{GN} \cos(90 - \beta) \quad (3.38)$$

$$P_{ZAV} = \frac{1 - P_C - P_{GN} \cos(90 - \beta) + 2P_{GN} \sin(90 - \beta)}{4} \quad (3.39)$$

$$P_{ZAR} = \frac{1 - P_C - P_{GN} \cos(90 - \beta) - 2P_{GN} \sin(90 - \beta)}{4} \quad (3.40)$$

$$P_{XG} = \frac{1 - P_C - P_{GN} \cos(90 - \beta) + 2P_{GN} \cdot \left( \frac{V_r}{V_t \cos(90 - \beta)} \right)}{4} \quad (3.41)$$

$$P_{XD} = \frac{1 - P_C - P_{GN} \cos(90 - \beta) - 2P_{GN} \cdot \left( \frac{V_r}{V_t \cos(90 - \beta)} \right)}{4} \quad (3.42)$$

Le cheminement d'une particule liquide à la surface du cylindre givré dépend des conditions atmosphériques représentées par le terme de la probabilité de congélation. Ce parcours est également influencé par l'action conjointe de, l'inclinaison du câble suivant l'axe Z, de la direction et de la vitesse du vent suivant l'axe X, de la vitesse terminale des gouttelettes. La vitesse terminale des gouttelettes dépend de leur taille. Dans un souci de simplification, toutes les gouttelettes ont la même taille donc la même vitesse terminale. Par soucis de simplification, le diamètre des gouttelettes d'eau est représenté par le diamètre volumique médian ou MVD (Median Volume Diameter en anglais). L'expression du MVD (mm) de la distribution est tirée des travaux de Best (1949).

$$MVD = 0,82 \cdot P^{0,24} \quad (3.43)$$

Avec  $P$  (mm/h), l'intensité des précipitations. Les MVD calculés pour chaque valeur de précipitation au moyen de l'Équation (3.43), sont présentés au Tableau 4. La moyenne qui est de 1mm a été utilisée durant les simulations numériques.

Intensité de précipitations en (mm/h)	MVD (mm)
0.50	0,69
1.00	0,82
1.50	0,90
2.00	0,97
2.50	1,02
3.00	1,07
3.50	1,11
4.00	1,14
4.50	1,17
5.00	1,20

Tableau 4: Les MVD en fonction de l'intensité des précipitations

### 3.5. Flexibilité en torsion des câbles et conducteurs

Dans cette section, il s'agira de présenter la technique employé pour tenir compte de la flexibilité en torsion des conducteurs de lignes de transmission d'énergie électrique. La torsion sera représentée par une rotation du cylindre. Les conducteurs recouverts de glace sont parfois, sous l'action du vent et de la gravité terrestre, soumis à des forces provoquant leur torsion. En effet, les conducteurs de lignes de transport d'énergie qui possèdent une grande flexibilité, tendent à tourner lorsque la glace se forme de manière asymétrique sur leur surface.

Des chercheurs ont mené des investigations dans ce sens afin de tenir compte des conditions réelles d'accumulation de glace atmosphérique sur les conducteurs de lignes, McComber (1983), Egelhofer et al. (1984), Fu (2004). Dans son modèle, McComber (1983) définit la torsion du cylindre fonction des forces gravitationnelles qui agissent sur

l'accumulation de glace sans tenir compte de l'influence du vent. À cet effet, il utilisa la méthode des éléments finis. Par contre, Egelhofer et al. (1984) développèrent un modèle qui en plus de l'influence de la charge de l'accrétion incorpore celle du vent. Ils ont aussi employé la méthode des éléments finis. Par contre, Fu (2004) présenta un modèle qui tient compte des deux paramètres, sauf qu'il utilise la méthode des éléments de frontières pour calculer l'influence du courant d'air. À la différence des deux premiers modèles, celui de Fu (2004) peut simuler l'accumulation de glace sur une plus longue période. Les modèles de McComber (1983), Egelhofer et al. (1984) ont été conçus pour les premiers instants du givrage.

Le modèle morphogénétique élaboré dans ce projet de recherche ne calcule pas la torsion du cylindre. Une vitesse de rotation est affectée arbitrairement au cylindre recouvert de glace. Celle-ci demeure constante durant toute la durée du givrage numérique. En pratique, la torsion du cylindre varie dans le temps pour des conditions atmosphériques données. Pour ce faire, une technique toute simple est mise en œuvre. En pratique, la rotation du cylindre s'effectue au fur et à mesure que la glace s'accumule sur le câble du conducteur face au vent. Le modèle utilise une approche discrète. Le cheminement des gouttelettes se fait de façon séquentielle. Par conséquent, une gouttelette ne peut être libérée avant que le cheminement de la gouttelette courante ne soit terminé. Le cheminement d'une gouttelette d'eau ne se fait pas en même temps que la rotation du cylindre.

La technique présentée dans le paragraphe suivant permet de simuler la rotation du cylindre. Le cylindre reste stationnaire pendant les simulations numériques. Par contre

chacune des particules de la glace accrétée décrit un mouvement circulaire suivant l'axe X de droite à gauche, Figure 16.

Dans leur mouvement, chacune des particules de glace décrit un cercle dont le rayon est la distance entre celle-ci et l'axe du cylindre. Un tour complet équivaut à  $360^\circ$ . Le mouvement circulaire de l'accrétion de glace se fait de manière discrète. Le cycle est divisé en 36 étapes, soit un décalage angulaire de  $10^\circ$  par étape. La vitesse de rotation du cylindre et la durée de l'accumulation déterminent le nombre d'étapes pour une durée de givrage donnée. Les vitesses de rotation du cylindre givré sont comprises entre 0,0001 et 5 tr/min. Cette plage de valeurs a été choisie car elle intègre les valeurs utilisées par Fu (2004) pour ses simulations. Celles-ci ont été expérimentalement obtenues par Personne et Gayet (1988) au cours du givrage expérimental d'un cylindre en rotation.

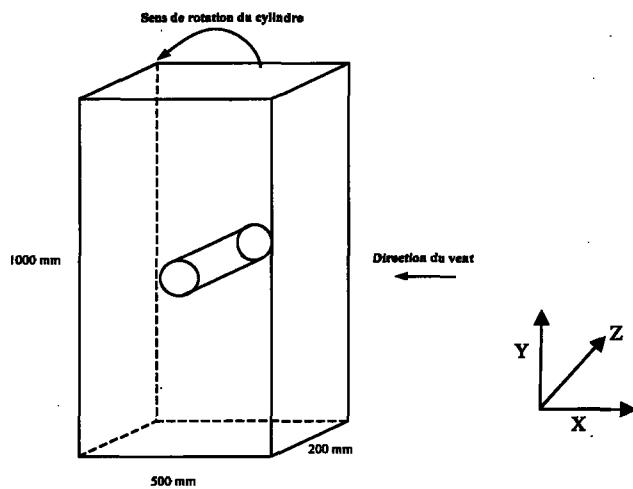


Figure 16: Représentation schématique du domaine simulation pour le givrage du cylindre en rotation.

## CHAPITRE IV

### TESTS PRATIQUES EN LABORATOIRE : DISPOSITIF ET PROCÉDURE

L'étude expérimentale est une amorce de la validation et de la calibration du modèle numérique morphogénétique. Cette étude a été effectuée au laboratoire des précipitations froides de la CIGELE à l'Université du Québec à Chicoutimi dans une chambre climatique. Les essais effectués dans la chambre climatique ont permis d'examiner l'influence de la température de l'air ambiant et de l'intensité des précipitations sur l'accumulation de glace.

Durant chaque série de tests, l'un des paramètres à l'étude a été varié pendant que les autres demeuraient constants. Le Tableau 5 présente les conditions expérimentales de l'étude qui examine l'influence de la température de l'air ambiant sur l'accrétion de glace. Le Tableau 6 présente les conditions expérimentales de l'étude qui a permis de faire l'investigation de l'influence de l'intensité des précipitations. L'intensité des précipitations est contrôlée avec le débit d'eau et la pression d'air à la sortie des gicleurs, au moyen d'un dispositif de contrôle présenté à la Figure 17. La variation de l'intensité des précipitations a été effectuée avec la variation du débit d'eau à la sortie des gicleurs pendant que la pression d'air demeurait constante. Les intensités de précipitations présentées aux Tableaux 5 et 6 sont 10 à 50 fois supérieures aux conditions naturelles. Il est impossible de reproduire de faibles intensités de précipitations, comme 0,5 ou 1mm/h par exemple, dans les laboratoires de la CIGELE. L'intensité de précipitations varie de 43 à 65mm/h.

Conditions standard	Cas N°	Température ambiante de la chambre climatique (°C)
Vitesse du vent : 4,7 m/s Pression de l'air dans les gicleurs : 103kPa. Débit d'eau : 320 cm <sup>3</sup> /min Intensité des précipitations : 59 mm/h Angle d'impact des gouttelettes : 40° Angle d'inclinaison du cylindre : 0° Durée expérience : 1h	1	-12
	2	-10
	3	-8
	4	-5
	5	-3
	6	-1

Tableau 5: Conditions expérimentales pour l'étude de l'influence de la température de l'air ambiant.

Conditions standard	Cas N°	Débit d'eau (cm <sup>3</sup> /min)	P (mm/h)	Angle d'impact des gouttelettes (°)
Vitesse du vent : 4,7 m/s	7	250	43	38
Pression de l'air dans les gicleurs : 103kPa.	8	290	51	39
Température : -5 °C	9	320	59	40
Angle inclinaison cylindre : 0°				
Durée expérience : 1h	10	360	65	42

Tableau 6: Conditions expérimentales pour l'étude de l'influence de l'intensité des précipitations.



Figure 17: Dispositif de contrôle de l'intensité des précipitations, pression de l'air : 0-100psi ; débit de l'eau : 0-650cm<sup>3</sup>/min

Il est difficile de générer des précipitations froides stables, en dehors de cet intervalle, à cause des limites technologiques du système de génération de pluies. Celui-ci est limité par le débit de l'eau et la pression d'air admissibles. Lorsque ces grandeurs atteignent leurs limites permises par le système, l'approvisionnement uniforme des gicleurs en eau s'estompe. L'approvisionnement uniforme en précipitations est une condition sine qua non à la validité des tests. Ces valeurs ont été utilisées en supposant qu'une validation du modèle numérique morphogénétique pour ces intensités de précipitations serait valide pour des conditions naturelles. Le spectre dimensionnel des gouttelettes des pluies froides de la chambre climatique n'a été réalisé, car le spectre dimensionnel des gouttelettes des précipitations verglaçantes n'influence pas l'accumulation de glace, Commission Électrotechnique Internationale (2003).

Le choix de la température, dans le Tableau 6, est justifié par la norme internationale 60826 de la Commission Internationale d'Électrotechnique. En effet, celle-ci stipule que la température à considérer dans les conditions de verglas est de -5°C, Commission Électrotechnique Internationale (2003).

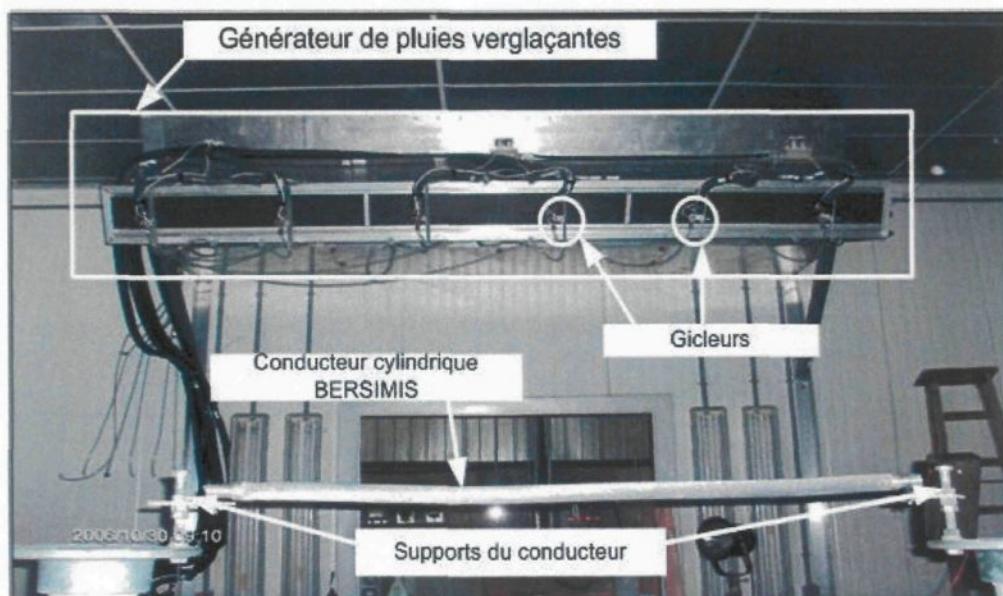


Figure 18 : Dispositif expérimental dans la chambre climatique.

L'étude expérimentale consiste à soumettre un conducteur de phase de type BERSIMIS (voir Annexe B) à une pluie artificielle froide. Le diamètre du conducteur est de 35 mm et sa longueur d'un mètre. Le conducteur est disposé horizontalement et supporté par un isolateur à chacune de ses extrémités, voir Figure 18. Les précipitations froides proviennent d'un générateur de gouttelettes d'eau. Ce générateur est constitué de six gicleurs pneumatiques montés sur un support horizontal. Compte tenu de la longueur du conducteur,

seulement quatre gicleurs ont été actifs pendant les expériences. En effet, les gouttelettes qui proviennent des gicleurs situés à chacune des extrémités du générateur de pluies verglaçantes, n'atteignent pas le conducteur. Les gicleurs actifs (quatre) observent un mouvement rectiligne dans le plan de la trajectoire des gouttelettes pour tenter d'obtenir une distribution uniforme de la pluie verglaçante à la surface du conducteur exposé. Des ventilateurs, qui produisent un flux d'air, sont disposés en arrière des gicleurs pour redresser la trajectoire des gouttelettes.

La composante horizontale de la vitesse des gouttelettes d'eau est considérée proche de la vitesse du vent. Etant donné que le vent est dans la même direction que les gouttelettes qui sortent des gicleurs, et considérant que ces gouttelettes d'eau sont de petite taille, leur vitesse d'impact et celle du vent sont très proches. La vitesse d'impact des gouttelettes est légèrement plus grande car elle prend en compte leur vitesse de chute. La vitesse d'impact des gouttelettes d'eau a été mesurée avec un anémomètre à hélice à des endroits proches de la ligne de stagnation du cylindre. La sonde qui mesure cette vitesse de vent est constituée d'une hélice à huit pâles, voir Figure 19. La sonde est placée perpendiculairement à la direction de l'écoulement forcé de l'air. L'anémomètre de la gamme HHF710 dont le numéro de série est «4200-02-6737», est fabriqué et distribué par le manufacturier OMEGA. L'intensité des précipitations, contrôlée par le débit de l'eau et la pression de l'air à la sortie des gicleurs, est mesurée au moyen du pluviomètre présenté à la Figure 20, Commission Électrotechnique Internationale (1991). Le pluviomètre est composé de deux

réservoirs. L'efficacité de collision des réservoirs est supposé égale à <sup>7</sup>. Chaque réservoir est muni à sa base d'une éprouvette graduée. La Figure 21 présente les dimensions du pluviomètre. Les entrées des réservoirs ont la forme d'une ellipse dont la longueur du segment porté par l'axe supérieur est égale à 0,127m, tandis que celui porté par l'axe inférieur est de l'ordre de 0,102m. Par conséquent, chacune des entrées du pluviomètre possède une surface  $s_p$  de 0,01m<sup>2</sup>.



Figure 19 : Anémomètre HHF710 du fabricant OMEGA<sup>8</sup>

L'anémomètre de la gamme HHF710 dont le numéro de série est «4200-02-6737», est fabriqué et distribué par le manufacturier OMEGA. L'intensité des précipitations, contrôlée par le débit de l'eau et la pression de l'air à la sortie des gicleurs, est mesurée au moyen du

<sup>7</sup> L'utilisation d'une efficacité de collision égale à 1, est une hypothèse raisonnable lorsque le pluviomètre est utilisé pour capturer des gouttelettes de pluies verglaçantes. Cependant lorsqu'il est employé pour capturer des gouttelettes de nuages givrants, l'efficacité de collision du pluviomètre peut être inférieure à 1, entraînant ainsi une sous-estimation significative de la teneur en eau liquide de l'intensité de précipitation équivalente.

<sup>8</sup> <http://www.omega.com>

pluviomètre présenté à la Figure 20, Commission Électrotechnique Internationale (1991).

Le pluviomètre est composé de deux réservoirs. L'efficacité de collision des réservoirs est supposé égale à  $1^9$ . Chaque réservoir est muni à sa base d'une éprouvette graduée. La Figure 21 présente les dimensions du pluviomètre. Les entrées des réservoirs ont la forme d'une ellipse dont la longueur du segment porté par l'axe supérieur est égale à 0,127m, tandis que celui porté par l'axe inférieur est de l'ordre de 0,102m. Par conséquent, chacune des entrées du pluviomètre possède une surface  $s_p$  de 0,01m<sup>2</sup>.



Figure 20 : Pluviomètre d'Hydro Québec

<sup>9</sup> L'utilisation d'une efficacité de collision égale à 1, est, une hypothèse raisonnable lorsque le pluviomètre est utilisé pour capturer des gouttelettes de pluies verglaçantes. Cependant lorsqu'il est employé pour capturer des gouttelettes de nuages givrants, l'efficacité de collision du pluviomètre peut être inférieure à 1, entraînant ainsi une sous-estimation significative de la teneur en eau liquide de l'intensité de précipitation équivalente.

La surface d'entrée d'un des réservoirs est dans un plan horizontal tandis que l'autre est dans un plan vertical. La technique utilisée pour mesurer l'intensité des précipitations est décrite ci-dessous. Le point supérieur de jonction des deux entrées est placé près de la ligne de stagnation, en s'assurant que la surface de l'entrée du réservoir 2 est parallèle au sol. Les valeurs  $q_x$  (ml) pour le réservoir 1 et  $q_y$  (ml) pour le réservoir 2 définissent respectivement les quantités d'eau recueillies dans le réservoir dont l'ouverture est dans le plan vertical et celui dont l'ouverture est dans le plan horizontal. Autrement dit, la normale de la surface d'entrée du réservoir 1 est colinéaire à l'axe horizontal et la normale de la surface d'entrée du réservoir 2 est colinéaire à l'axe vertical. Le pluviomètre est soumis à un jet d'eau, provenant du générateur de pluies froides, pendant un temps  $t_{pl}$  (s). La surface du pluviomètre exposée est égale à  $2 \times s_p$ .  $P_n$  (mm/h), l'intensité des précipitations par rapport à la normale est donnée par l'Équation 4.1 :

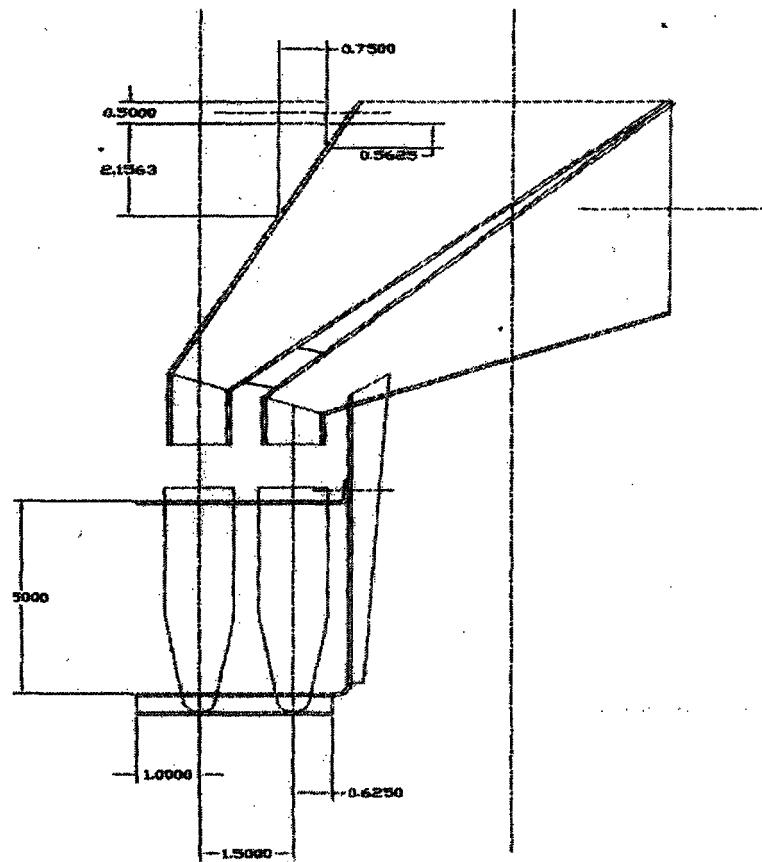
$$P_n = (q_x^2 + q_y^2)^{0.5} \cdot \frac{3.6}{t_{pl} s_p} \quad (4.1)$$

Précisons que l'intensité des précipitations selon les météorologues ne tient compte que de  $q_y$ . Par conséquent, l'intensité des précipitations,  $P$  (mm/h) selon les météorologues est :

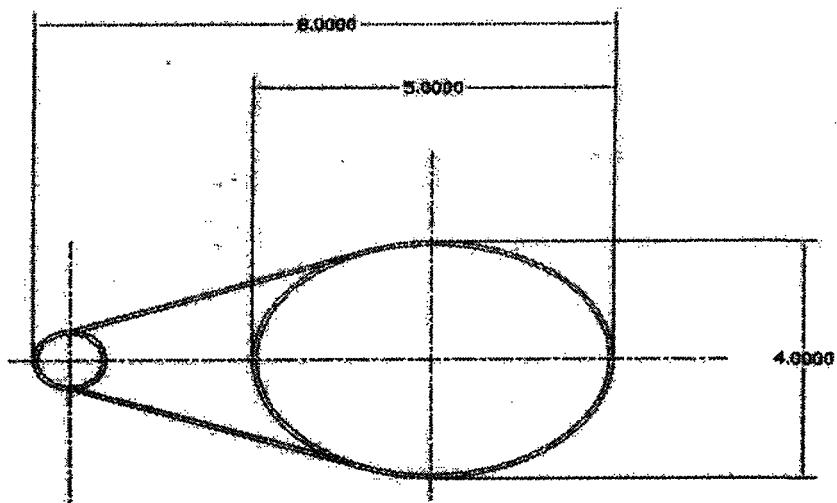
$$P = q_y \cdot \frac{3.6}{t_{pl} s_p} \quad (4.2)$$

L'angle d'impact des gouttelettes,  $\Phi$  ( $^{\circ}$ ), est mesuré à l'aide du pluviomètre présenté à la Figure 20 et défini par l'Équation (4.3). Le pluviomètre est supposé avoir une efficacité de collecte des gouttelettes égale à 1.

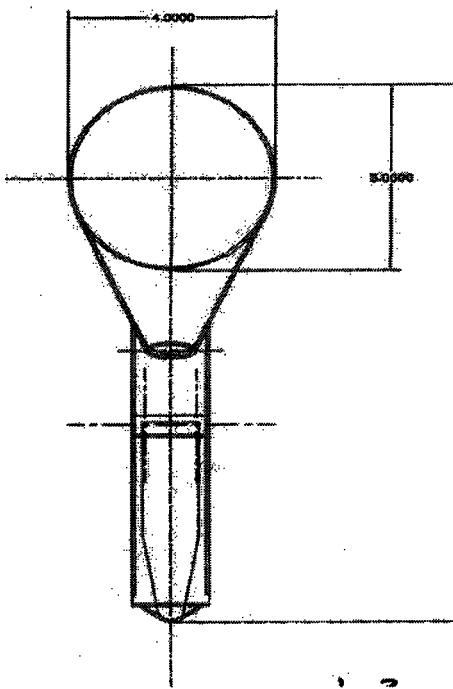
$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{q_x}{q_y} \right) \quad (4.3)$$



21. a



21. b



21. c

Figure 21 : Caractéristique du pluviomètre d'Hydro Québec<sup>10</sup>

<sup>10</sup> Les dimensions exprimées en pouces

Le générateur de pluies froides est alimenté par de l'eau domestique provenant du refroidisseur, présenté à la Figure 22. La température de l'eau à sa sortie (soit 2°C) est ajustée par un contrôleur PID, voir Figure 23. L'eau est considérée isolée du refroidisseur aux gicleurs. Le dispositif de lecture du refroidisseur indique une température presque égale à la température de l'eau recueillie à la sortie du générateur de pluies verglaçantes. La variation de la température de l'eau du refroidisseur aux gicleurs a été ignorée, en considération des observations présentées ci-dessous. Deux thermocouples ont été utilisés. Le premier est placé près du conducteur soumis au givrage et le second est disposé à la sortie d'un gicleur. Le premier indiqua une température de 1,8°C alors que le second mesura une température de 2°C. Cette mesure a été réalisée à une température de -12°C dans la chambre climatique. Cette absence de refroidissement de l'eau pulvérisée avant d'atteindre le cylindre est due à la faible distance qu'elle a parcourue, soit 4 m.



Figure 22 : Refroidisseur d'eau



Figure 23 : Dispositif de lecture de la température de l'eau à la sortie du refroidisseur



Figure 24 : Procédure de dégagement du conducteur givré.

Les gouttelettes d'eau qui sont à une température 2°C ne sont pas en surfusion. L'on parle de surfusion lorsque la gouttelette d'eau demeure à l'état liquide pour des températures inférieures à son point de solidification, c'est-à-dire 0°C. Dans notre cas, cet état n'est pas atteint à cause de la faible distance que les précipitations froides ont à parcourir de la sortie des gicleurs au conducteur.

Les accumulations de glace ont été prises en photo sous différents angles. Une plaque d'aluminium en forme de "U" est chauffée à l'aide d'un chalumeau au propane. La plaque chaude est utilisée pour dégager, de ses supports, le conducteur recouvert de glace, Figure24. La masse de la glace est déduite de la masse du conducteur recouvert de glace. Les accumulations de glace obtenues au terme des tests pratiques en laboratoires présentés dans ce chapitre, ont été comparées aux résultats numériques du modèle morphogénétique. Le chapitre 5 présente les résultats et les analyses issus de cette étude comparative qualitative et quantitative.

## CHAPITRE V

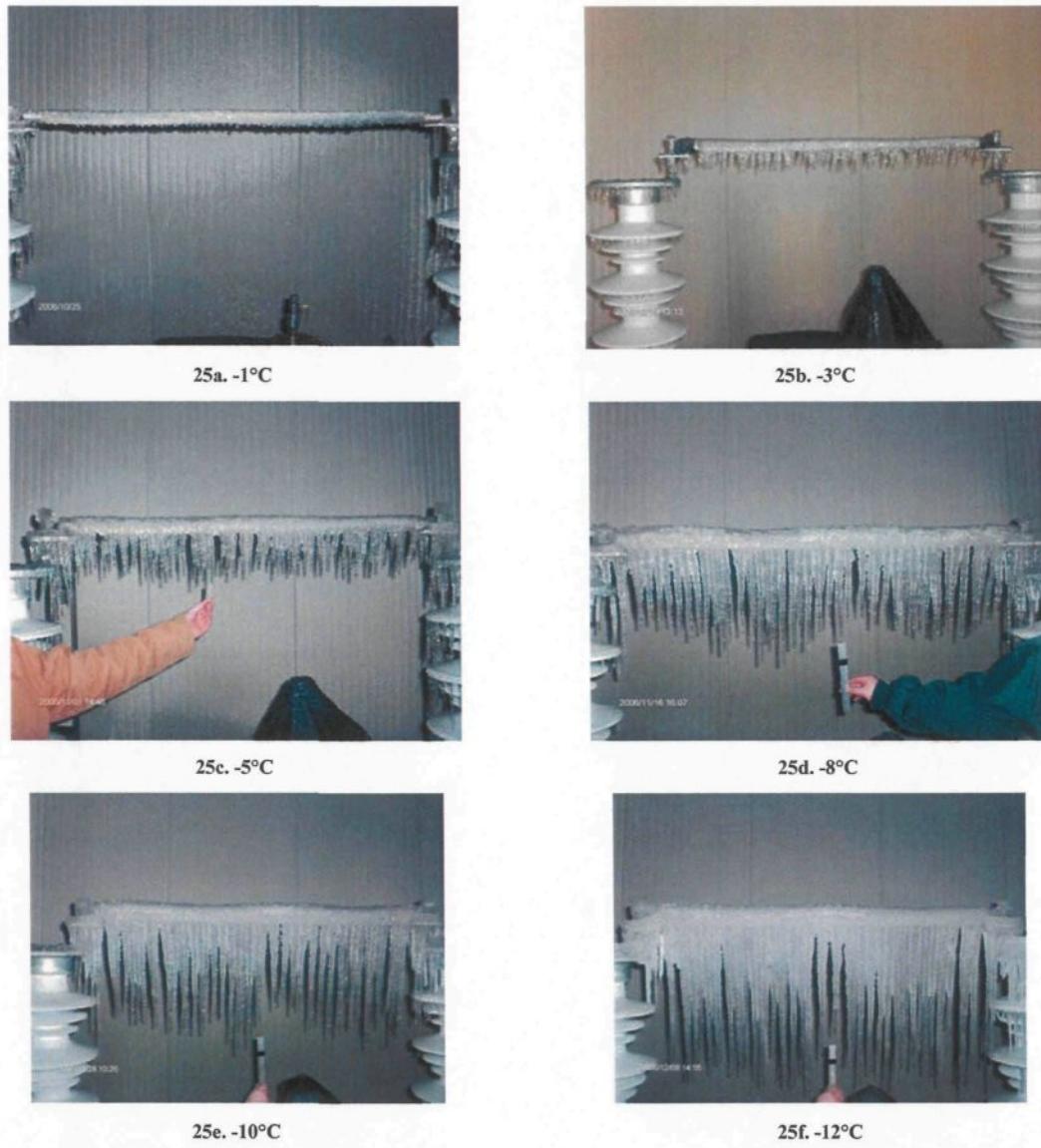
### RÉSULTATS ET DISCUSSION

Un court séjour du candidat à l'Université d'Alberta lui a permis de faire l'apprentissage des méthodes de soumission, à distance, du code numérique aux ordinateurs du WESTGRID pour exécution. L'avantage de cette pratique est la capacité de faire plusieurs exécutions simultanée du code numérique. Ce dernier est exécuté cinq fois pour chaque cas, en raison du caractère stochastique de la méthode employée. Les résultats obtenus sont comparés aux tests pratiques réalisés en laboratoire. Les conditions expérimentales sont présentées aux tableaux 5 et 6 présentant respectivement les conditions expérimentales pour l'étude de l'influence de la température et de l'intensité des précipitations.

#### 5.1 Influence de la température sur le processus d'accumulation de la glace

Cette section examine l'influence de la température de l'air ambiant sur le processus de givrage. Les paramètres restés inchangés pendant la série de tests expérimentaux sont : l'intensité des précipitations, 59mm/h ; la vitesse du vent, 4,7m/s ; l'angle d'impact des gouttelettes d'eau, 40° ; la durée de l'accumulation de glace, 1h ; l'angle d'inclinaison du conducteur, 90°. Lorsque le cylindre est entièrement dans le plan horizontal, son angle d'inclinaison est égal à 90°. La Figure 25 présente les accumulations de glace obtenues. Les Figures 25a à 25f témoignent de l'évidence de la congélation d'un film d'eau qui ruisselle.

Très peu (ou pas) de gouttelettes gèlent spontanément sur la partie supérieure du manchon de glace comme en témoigne une bien modeste croissance de l'épaisseur de glace entre les tests 25a (-1 °C) et 25f (-12 °C). Un film d'eau est omniprésent dans tous les cas de figure, au regard de la forte intensité de précipitation qui est de 59mm/h. Lorsque la température ambiante est égale à -1 °C (Figure 25a), il y a formation de petits glaçons. Une diminution de la température engendre un rallongement et un épaississement des glaçons, comme observé aux Figures 25b à 25f. Le rallongement des glaçons est dû à un accroissement du flux de chaleur externe vers l'air qui est combiné à la disponibilité de l'eau sous le cylindre recouvert de glace. L'intensité du givrage est inversement proportionnelle à la température ambiante dans une certaine plage de températures. En effet, pour -5, -8, -10 et -12 °C, l'accumulation est plus importante, Figures 25c à 25f. Une basse température de l'air ambiant accélère les pertes thermiques convectives et évaporatoires des gouttelettes d'eau interceptées. Ceci permet à une grande partie des gouttelettes interceptées de geler sur le cylindre recouvert de glace. À -3°C et -5°C, l'espacement des glaçons est net, Figures 25b et 25c. Par contre, à -8, -10 et -12°C, l'espacement des glaçons devient étroit. Les gouttelettes froides provenant du générateur de gouttelettes d'eau atteignent directement la base du conducteur, c'est-à-dire les racines des glaçons et gèlent peu de temps après leur impact. Comme la perte de chaleur est plus importante pour de faibles températures, le temps qu'une gouttelette interceptée gèle, quelque temps après son impact, est réduit. Autrement dit, une grande partie du nombre de gouttelettes d'eau qui atteignent les racines des glaçons, gèle rapidement. Cela conduit à un épaississement de la racine des glaçons, Figures 25e à 25f.



**Figure 25 :** Résultats expérimentaux de l'influence de la température ambiante sur le givrage d'un cylindre.  
 Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; longueur du cylindre 1m ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7 m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du conducteur 90°. La partie supérieure de la barre de métal, limitée par un ruban noir, a une longueur de 5cm.

Notons qu'à de basses températures, la longueur des glaçons augmente rapidement. La glace se forme en grande partie sur la face du conducteur recouvert de glace en regard de la trajectoire des gouttelettes froides, Figures 26a et 26b.



Figure 26: Vue arrière du cylindre givré : température de l'air ambiant  $-3^{\circ}\text{C}$  et  $-12^{\circ}\text{C}$  ; Conditions standard : diamètre du cylindre toronné 35 mm ; longueur du cylindre 0,2 m ; intensité des précipitations 59 mm/h ; vitesse du vent 4,7 m/s ; angle d'impact des gouttelettes  $40^{\circ}$  ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du conducteur  $90^{\circ}$ .

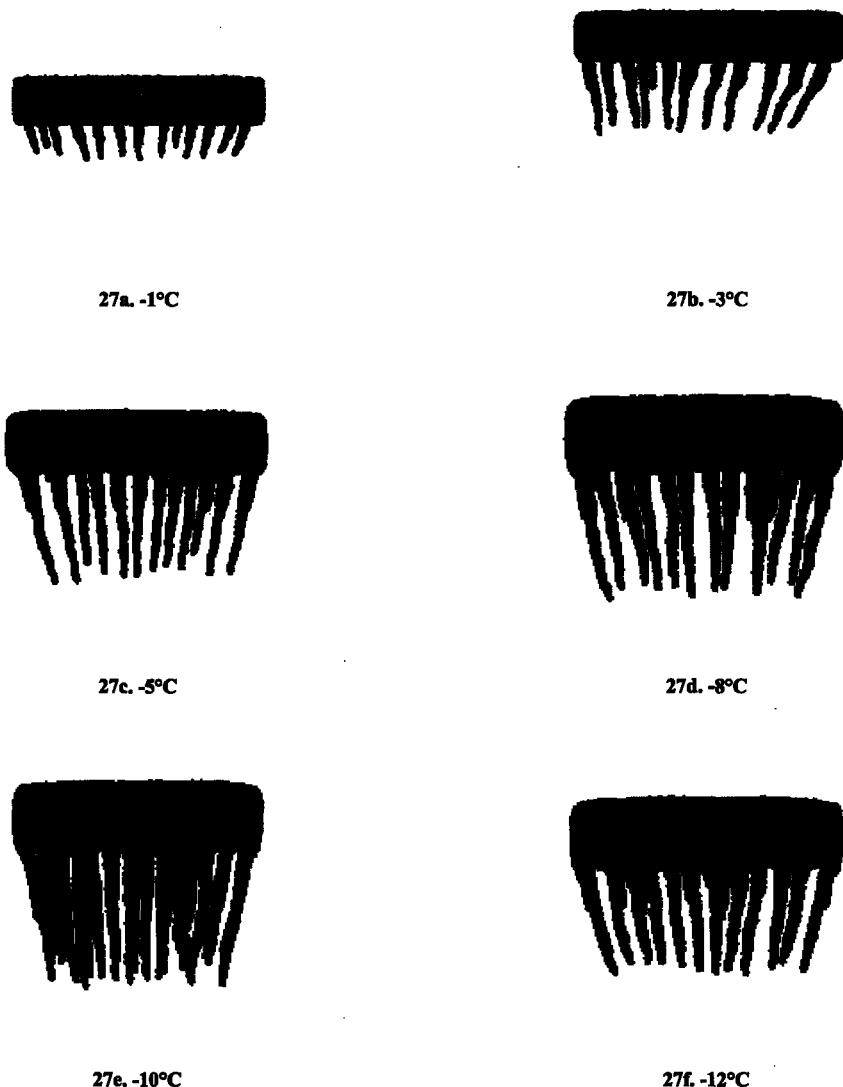
En effet, avec un angle d'impact de  $40^{\circ}$ , les gouttelettes d'eau interceptées ne peuvent pas atteindre directement la partie arrière du cylindre. Cependant, certaines gouttelettes interceptées accèdent à la partie arrière du conducteur sous l'action combinée du vent et de la gravité terrestre. Concomitamment, le vent de vitesse assez élevée entraîne le délestage de certaines gouttelettes d'eau situées à l'interface entre la surface du conducteur recouvert de glace faisant face aux gicleurs et celle à l'arrière du conducteur. Cela traduit une faible adhésion des gouttelettes d'eau à la surface du conducteur.

Les surfaces supérieures d'un cylindre recouvert de glace obtenues par les simulations numériques du modèle morphogénétique sont présentées à la Figure 27. Les températures de l'air ambiant -1 et -3°C sont les seules pour lesquelles la surface du cylindre n'est pas entièrement recouverte de glace. Cela est dû au flux de chaleur externe qui est assez faible pour permettre aux particules liquides interceptées de geler quelque temps après leur impact. Par conséquent, elles se dirigent vers le bas de l'ensemble de la structure où elles peuvent quitter celle-ci par délestage. Pour des températures plus faibles, le temps de cheminement des particules liquides est réduit, Figures 27c à 27f. Alors, la partie du cylindre faisant face à la trajectoire des particules liquides.

La différence des formes de l'accumulation de glace entre les résultats expérimentaux et numériques est due au fait qu'expérimentalement le délestage se produit n'importe où sur la surface du cylindre recouvert de glace<sup>11</sup>. Contrairement à l'approche numérique qui n'autorise le délestage qu'aux bouts des glaçons. Les formes de l'accrétion de glace issues des simulations numériques du modèle morphogénétique sont présentées aux Figures 28a-f. L'observation de ces formes de glace montre que l'espace entre les bases des glaçons décroît lorsque la température de l'air ambiant diminue. Étant donné que la probabilité de congélation est proportionnelle au flux de chaleur externe, les gouttelettes gèlent quelque temps après leur impact.

---

<sup>11</sup> *Le délestage expérimental des gouttelettes d'eau en arrière de l'ensemble de la structure a été observé au travers de la baie vitrée de la chambre climatique.*

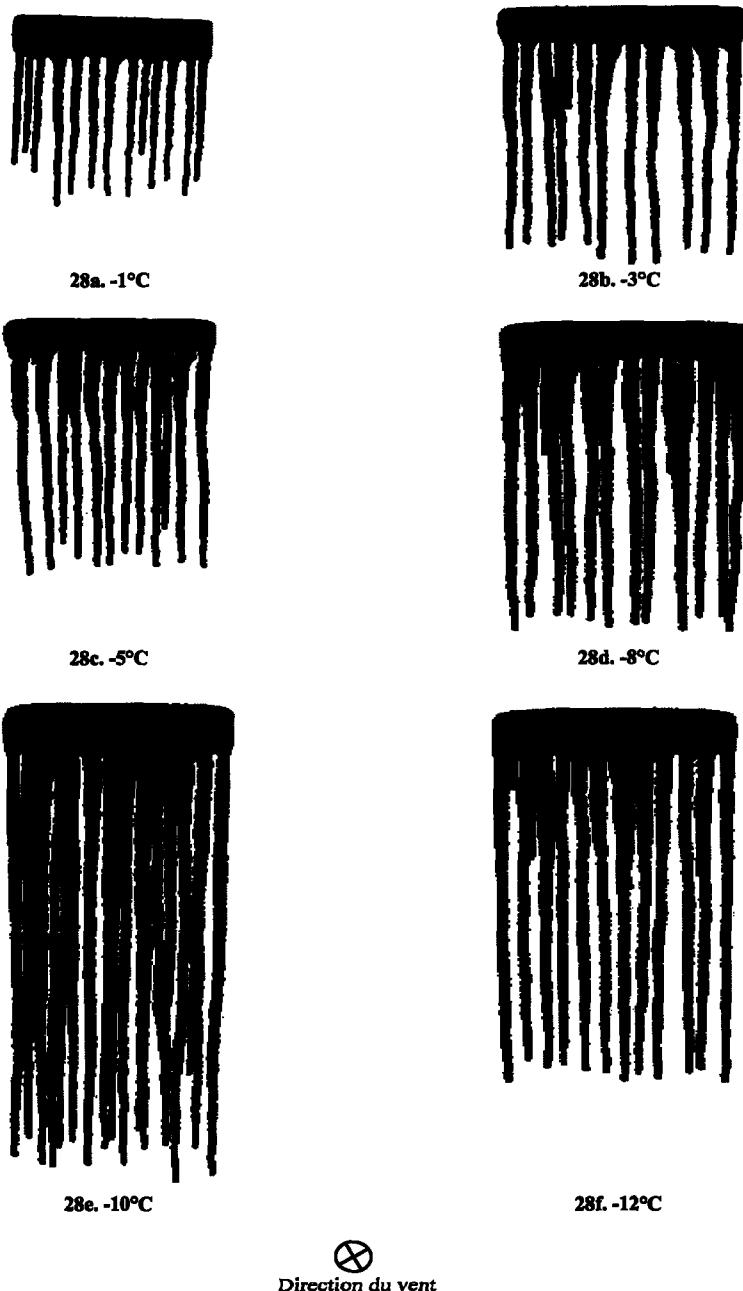


**Figure 27 : Résultats numériques, surface supérieure du cylindre recouvert de glace en regard du vent, étude de l'influence de la température ambiante – Conditions standard : diamètre du cylindre non toronné 35mm ; longueur du cylindre 0,2m ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.**

Cependant, l'épaisseur des racines des glaçons est plus faible par rapport à celle obtenue expérimentalement. Cela pourrait s'expliquer par le coefficient de transfert thermique du cylindre nu appliqué à toute la surface du cylindre recouvert de glace. Le coefficient est plus élevé pour les glaçons en raison de leur faible diamètre. En effet, le coefficient de transfert thermique est inversement proportionnel au diamètre du cylindre, Eyglunent(1997). Le Tableau 7 présente, les valeurs de la probabilité de congélation et du paramètre de délestage des simulations numériques.

Température de l'air ambiant	Probabilité de congélation de la première gouttelette qui gèle	Probabilité de congélation de la dernière gouttelette qui gèle	Paramètre de délestage de la première gouttelette libérée	Paramètre de délestage de la dernière gouttelette libérée
-12°C	1	0,0008121	-----	903,9
-10°C	1	0,0006294	-----	1148,2
-8°C	0,12758	0,0005649	9902	848,7
-5°C	0,02741	0,0003799	1560,4	807,6
-3°C	0,009597	0,0002750	1146,1	782,3
-1°C	0,0015191	0,00014920	998,3	758,5

**Tableau 7: Valeurs de la probabilité de congélation et du paramètre de délestage des simulations numériques.**  
 Conditions standard : diamètre du cylindre non toronné 35mm ; longueur du cylindre 0,2m ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des particules liquides 40° ; durée de l'accumulation 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.



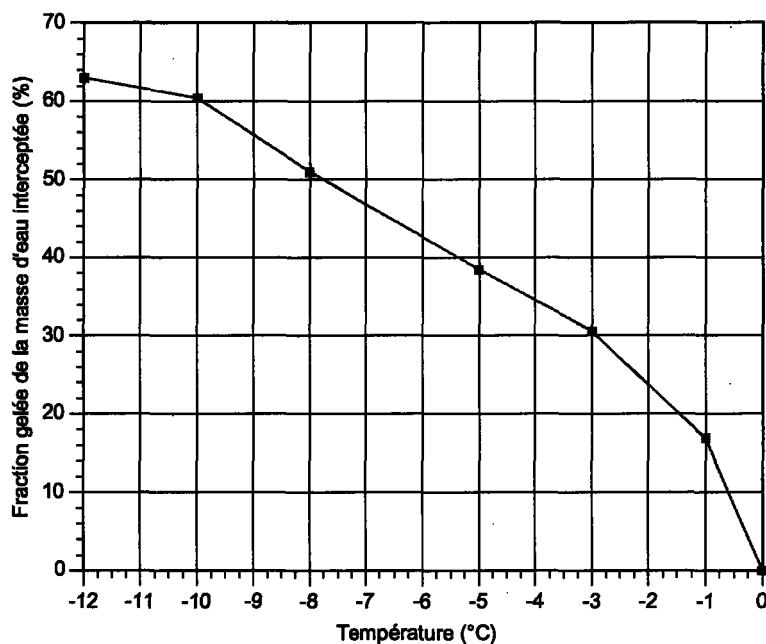
**Figure 28:** Résultats numériques, vue de face des accumulations de glace obtenues pour l'étude de l'influence de la température de l'air sur l'accumulation de glace - modèle morphogénétique. Conditions standard : diamètre du cylindre non toronné 35mm ; longueur du cylindre 0,2m ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7 m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée de l'accumulation 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.

D'après les valeurs présentées au Tableau 7, la probabilité de congélation diminue avec la température. Par contre, le paramètre de délestage croît de -12 à -10°C avant de commencer à diminuer pour une augmentation de la température de l'air ambiant en raison des glaçons moins rallongés à -12°C. Cette variation du paramètre de délestage pourrait expliquer la diminution de la longueur des glaçons de -10 à -12°C, comme observé aux Figures 28e et 28f. Le paramètre de délestage influence la longueur des glaçons et vis-versa, il s'agit donc d'un processus avec feedback. En effet, lorsque le paramètre de délestage est élevé, les particules liquides restent plus longtemps sous le cylindre givré. Ce processus augmente la probabilité de congélation des particules liquides qui entraîne une augmentation de la longueur des glaçons. Une diminution du paramètre de délestage signifie une augmentation de la vitesse d'égouttement qui entraîne une diminution de la longueur des glaçons.

La masse de l'accumulation de glace est proportionnelle à la quantité d'eau interceptée. La fraction de la masse d'eau interceptée qui a gelée est inversement proportionnelle à la température de l'air ambiant, Figure 29. En moyenne, l'écart-type est moins de 1%. Cet écart-type découle de plusieurs simulations de conditions atmosphériques identiques avec des arguments différents du générateur de nombres pseudo aléatoires. La température à la surface du cylindre recouvert de glace est supposée égale au point de congélation de l'eau, c'est-à-dire 0°C, dans les simulations numériques. Aussi, il a été posé que les particules liquides ont une température identique à celle de l'air ambiant. Une diminution de la température de l'air a pour effet d'accroître la différence de température entre la masse d'eau interceptée (qui est supposée être à la même température que celle de l'air ambiant)

et la surface du cylindre recouvert de glace. Les transferts thermiques les plus importants dans ce cas dépendent en majorité de cette différence de température.

Un accroissement de la différence de température entre l'air ambiant et la surface du cylindre recouvert de glace, accentue les pertes de chaleur, entraînant ainsi une augmentation de la probabilité de congélation des particules liquides interceptées. Pour des températures faibles, la perte de chaleur est suffisante pour qu'une grande partie des particules liquides interceptées gèle, et soient incorporées à la masse de glace existante. Les simulations numériques du modèle morphogénétique indiquent qu'environ 63% de la masse d'eau interceptée gèle sur le cylindre pour une température ambiante de -12 °C.

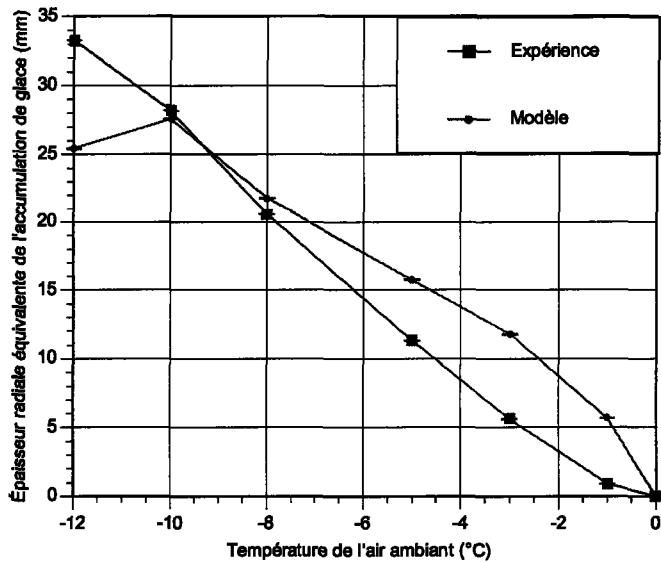


**Figure 29:** Influence de la température ambiante sur la fraction gelée de la masse d'eau interceptée. Conditions standard idem à celles de la Figure 28. Écart-type numérique 0,0001%.

Lorsque la température ambiante est supérieure à -10°C, la masse d'eau interceptée délestée devient plus importante à cause de la faible différence de température entre l'air et la surface du cylindre recouvert de glace.

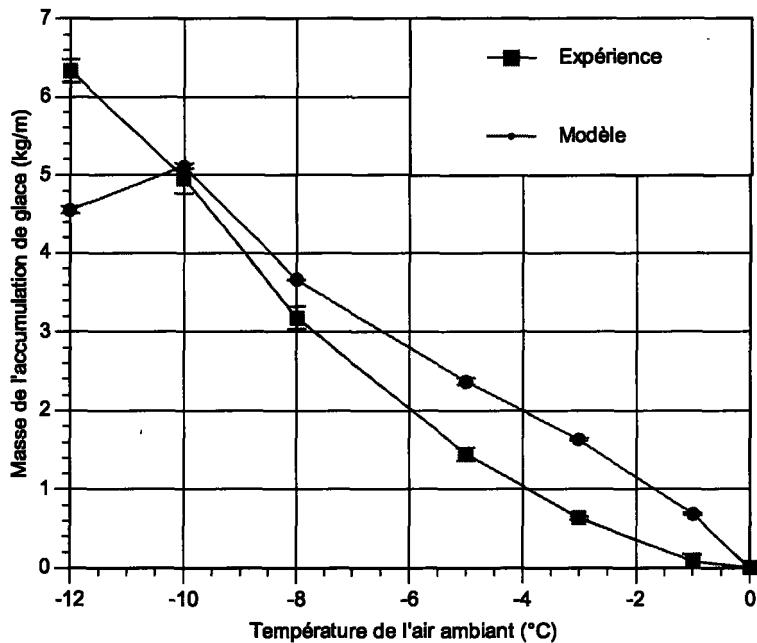
La charge de glace est généralement exprimée en N/m, ou en termes d'épaisseur uniforme radiale du manchon de glace (mm) entourant les conducteurs de phase ou les câbles de garde, Commission Électrotechnique Internationale (2003). L'épaisseur radiale équivalente de l'accumulation de glace en fonction de la température de l'air ambiant est présentée à la Figure 30. Les épaisseurs uniformes radiales équivalentes obtenues par simulations numériques pour les mêmes entrées, avec un argument différent pour le générateur de nombres aléatoires, sont quasi égales.

L'épaisseur uniforme radiale équivalente est inversement proportionnelle à la température de l'air ambiant pour des températures supérieures à -10°C. En effet, lorsque la température de l'air ambiant diminue, la probabilité de congélation des particules liquides augmente, et il y a moins d'égouttement. Cela entraîne à une croissance de l'accrétion de glace, d'où l'augmentation de l'épaisseur uniforme radiale, voir Figure 31. Une probabilité de congélation élevée dénote que les particules liquides interceptées par le cylindre recouvert de glace gélent peu de temps après leur impact. Cela a pour effet de raccourcir les glaçons lorsque la température de l'air ambiant est inférieure à -10°C, Figure 32. L'intensité du givrage décroît avec la diminution du nombre de particules liquides interceptées. Cela pourrait expliquer la diminution de l'épaisseur radiale équivalente quand la température de l'air est inférieure à -10°C, voir Figure 30. Par conséquent, la forme de l'accumulation de glace joue un rôle important dans le processus.



**Figure 30: Influence de la température sur l'épaisseur uniforme radiale équivalente. Conditions standard idem à celles de la Figure 28. Écart-type numérique 0,008mm**

La Figure 31 présente l'influence de la température de l'air ambiant sur la masse de la glace accrétée. En moyenne, l'écart-type entre les résultats est de 0,025kg. La Figure 31 présente une comparaison quantitative entre les résultats numériques et expérimentaux. Dans les deux cas, la masse croît lorsque la température diminue. L'intensité du givrage est proportionnelle à la quantité des particules liquides interceptées et influencée par la formation des glaçons. En effet, les glaçons augmentent la section du cylindre recouvert de glace, qui intercepte les particules liquides. L'espacement de la base des glaçons décroît lorsque la température ambiante baisse. Les espacements étroits entre les glaçons permettent ainsi à l'ensemble de la structure d'intercepter plus de particules liquides.



**Figure 31 : Influence de la température ambiante sur la masse de la glace accumulée.**  
 Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°. Écart-type numérique 0,025kg ; Écart-type expérimental 0,1kg.

Pour les expériences pratiques en laboratoire, de -12 à -5°C, l'on observe un taux de décroissance de la masse de 0,7kg/m/°C, et de l'ordre de 0,34kg/m/°C de -5 à -1°C. Cette diminution s'observe également pour les résultats numériques. En effet, il y a une décroissance de 0,72kg/m/°C, entre -10°C et -8°C qui s'établit ensuite à 0,43kg/m/°C de -8 à -1°C. Comme nous pouvons l'observer, les taux de variation de la masse de glace sont différents. Cette différence pourrait s'expliquer par la technique employée pour traiter le processus de délestage dans le modèle numérique morphogénétique. Tel que mentionné dans les paragraphes précédents, l'observation des expériences pratiques révèle que certaines particules liquides d'eau interceptées quittent la surface du conducteur recouvert

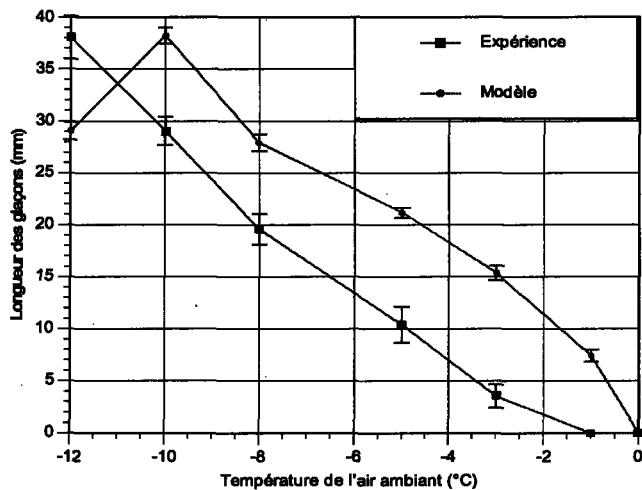
de glace sous l'action combinée du vent et de la gravité terrestre. Le délestage peut alors se faire n'importe où sur la surface du conducteur recouvert de glace, contrairement au modèle morphogénétique dans lequel l'égouttement n'est permis qu'au bout des glaçons.

L'observation des expériences montre que les gouttelettes d'eau quittent le conducteur recouvert de glace plus rapidement lorsque les températures augmentent. Cela entraîne une faible variation de la forme de l'accumulation de glace. La diminution de l'intensité du givrage est due à une faible variation des caractéristiques des glaçons (longueur et épaisseur). Dans le modèle numérique, le délestage se produit à l'un des bouts de l'accumulation de glace. Les particules liquides interceptées quittent le cylindre recouvert de glace moins rapidement parce qu'elles doivent atteindre l'un des bouts de l'accumulation avant d'être délestées. Ce processus a une influence importante sur la forme de la glace accumulée pour des températures élevées, à cause de l'espacement et de la longueur des glaçons. Lorsque les températures sont faibles, les particules liquides gèlent peu de temps après leur impact, entraînant ainsi une réduction de la longueur des glaçons.

De -10 à -1°C, la masse de la glace accumulée pendant les simulations numériques est élevée. Cette surestimation pourrait s'expliquer par l'une des hypothèses utilisées dans le modèle numérique. L'efficacité de collecte des gouttelettes est fixée à l'unité. Par conséquent, le phénomène d'éclaboussure est ignoré. Mais, les gouttelettes d'une pluie verglaçante étant de grande taille, une partie du volume des gouttelettes d'eau interceptées, est perdue après leur impact. La masse d'eau effectivement interceptée en laboratoire est logiquement plus faible que celle des simulations numériques. Cette masse d'eau

effectivement interceptée étant directement proportionnelle à la masse totale de la glace entraîne une surestimation de l'accumulation par le modèle morphogénétique.

L'accumulation de la glace est en grande partie due à la quantité des gouttelettes interceptées. Elles conduisent à de longs glaçons dépendamment du flux de chaleur vers l'air et de la disponibilité de l'eau sous le cylindre recouvert de glace. Une grande quantité de la masse d'eau effectivement interceptée conduit à de longs glaçons. Ces derniers favorisent une accumulation de glace plus importante. Ce feedback devrait conduire à une valeur infinie de la masse de glace accumulée, mais il n'en est rien. Cette interaction est contrôlée par le délestage qui constitue un frein à la croissance infinie des glaçons.



**Figure 32: Influence de la température sur la longueur des glaçons.** Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40°; durée de l'accumulation 1h; angle d'inclinaison du cylindre 90°. Écart-type numérique 0,7cm ; Écart-type expérimental 1,3cm.

La Figure 32 présente les effets de la température ambiante sur la longueur des glaçons. Elle diminue avec la température. Il y a une différence quantitative entre les résultats numériques et expérimentaux. L'écart pourrait s'expliquer par une plus grande masse d'eau effective dans le modèle numérique. Par conséquent, un grand nombre de particules liquides atteint les bouts de l'accumulation de glace. La longueur des glaçons atteint son maximum à  $-10^{\circ}\text{C}$  pour le modèle morphogénétique, Figure 32. La masse de la glace accumulée et la longueur des glaçons peuvent être exprimées par une fonction mathématique qui dépend de la température ambiante de l'air.

Pour  $-12^{\circ}\text{C} \leq T_a \leq 0^{\circ}\text{C}$

$$M_E(T_a) = 0.0019044T_a^3 + 0.06804T_a^2 + 0.015941T_a + 0.06315 \quad (5.1)$$

$$M_N(T_a) = 0.006263T_a^3 + 0.10466T_a^2 + 0.02166T_a + 0.70097 \quad (5.2)$$

Avec  $M_E$  et  $M_N$  exprimés en kg/m. Les indices  $E$  et  $N$  désignent respectivement expérience et numérique ;  $T_a$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) est la température de l'air ambiant. Pour la longueur des glaçons, les fonctions mathématiques pour  $-12^{\circ}\text{C} \leq T_a \leq 0^{\circ}\text{C}$ , sont présentées ci-dessous :

$$L_E(T_a) = 0.009192T_a^3 + 0.03432T_a^2 - 0.3753T_a \quad (5.3)$$

$$L_N(T_a) = 0.019002T_a^3 + 0.04481T_a^2 - 4.772T_a \quad (5.4)$$

Avec  $L_E$  et  $L_N$  exprimés en cm. Plusieurs tentatives ont été réalisées afin de trouver des fonctions représentant le mieux les courbes des Figures 31 et 32. Les Équations 5.1, 5.2, 5.3 et 5.4 représentent au mieux les différentes courbes pour les températures à l'étude. Ces équations sont graphiquement représentées à même les courbes, Figures 33 et 34. Lorsque les températures de l'air ambiant sont inférieures à  $-10^{\circ}\text{C}$ , la masse de la glace accrétée et la

longueur des glaçons diminuent pour les résultats numériques tandis qu'elles continuent de croître pour les résultats expérimentaux.

La croissance des glaçons est un processus complexe. D'une part, une diminution de la température ambiante accroît l'intensité du givrage aux bouts de l'accumulation de glace. Car il y a moins de particules liquides qui quittent le cylindre recouvert de glace par délestage. D'autre part, il y a moins d'eau disponible sous le cylindre recouvert de glace. Ceci est provoqué par une augmentation de l'intensité du givrage sur sa surface supérieure. Ces deux processus physiques sont opposés. En effet, des températures ambiantes élevées sont dans un premier temps associées à de petits glaçons. Une baisse de la température ambiante entraîne une augmentation de la longueur des glaçons.

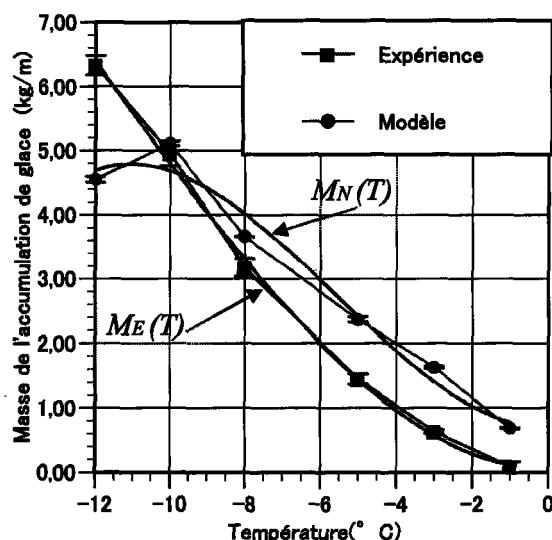


Figure 33: Fonctions estimées de l'influence de la température sur la masse de la glace. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h; vitesse du vent 4,7m/s; angle d'impact des gouttelettes 40°; durée du givrage 1h; angle d'inclinaison du cylindre 90°.

Lorsque les températures de l'air sont faibles, la longueur des glaçons diminue quand la température baisse, car les gouttelettes gèlent sur les surfaces latérales des glaçons. Par contre, les glaçons s'allongent expérimentalement en dessous de  $-10^{\circ}\text{C}$ . Cette différence pourrait s'expliquer par une surestimation de l'influence de la température ambiante dans le modèle numérique. Par conséquent, l'atteinte de la longueur maximale des glaçons se fera à une température inférieure à celle indiquée sur la courbe numérique à savoir  $-10^{\circ}\text{C}$ .

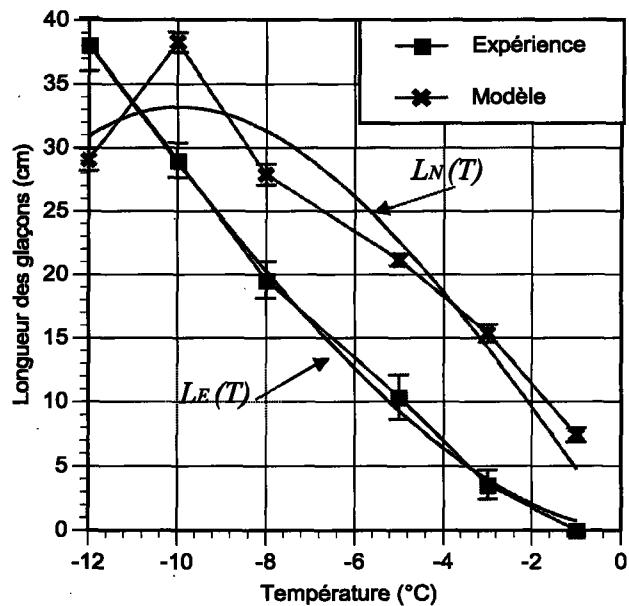
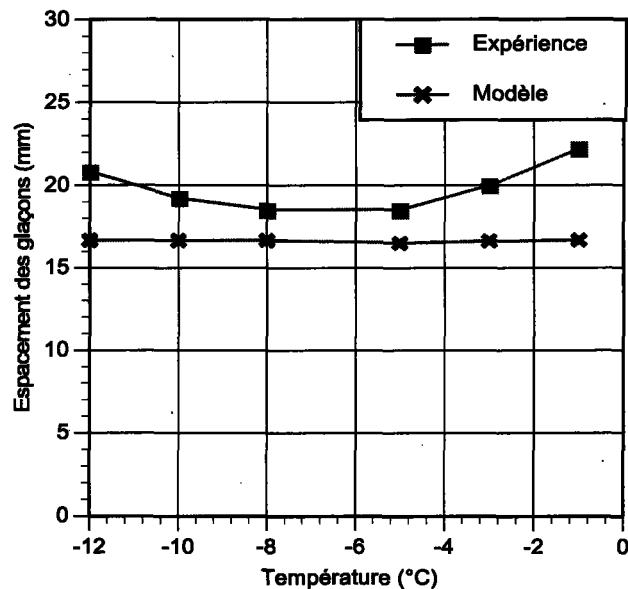


Figure 34: Fonctions estimées de l'influence de la température sur la longueur des glaçons. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59 mm/h; vitesse du vent 4,7m/s; angle impact des gouttelettes  $40^{\circ}$ ; durée de l'accumulation 1h; angle d'inclinaison du cylindre  $90^{\circ}$ .

L'espacement des glaçons est défini par le nombre de glaçons sans considération de leur épaisseur. Par conséquent, l'espacement des glaçons,  $E_{G1}$  (mm), est exprimé comme suit :

$$E_{G1} = \frac{L \cdot 1000}{N_{G1}} \quad (5.5)$$

Où  $L$  (m), est la longueur du cylindre ; et  $N_{G1}$ , le nombre de glaçons sous le cylindre givré. La Figure 35 présente l'influence de la température de l'air ambiant sur l'espacement des glaçons. L'espacement des glaçons diminue expérimentalement lorsque la température de l'air décroît. En effet, de -1 à -5°C, il y a une réduction de l'espacement des glaçons de l'ordre de 0,74mm/°C.



**Figure 35: Influence de la température sur l'espacement des glaçons.**  
**Conditions standard :** diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée de l'accumulation 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.

Cette diminution s'explique par le fait que, le flux de chaleur vers l'air augmente quand la température ambiante baisse. Ceci occasionne une congélation rapide des particules liquides peu de temps après leur impact, les empêchant ainsi d'atteindre la surface en dessous du cylindre recouvert de glace. La conséquence de ce processus est une diminution du nombre de glaçons sous le cylindre recouvert de glace, d'où l'augmentation de l'espacement des glaçons. L'observation de la Figure 35 montre que l'espacement expérimental des glaçons est quasi constant malgré une diminution de la température de l'air ambiant de -5 à -8°C. Lorsque la température de l'air ambiant continue de baisser au-delà de -8°C, l'espacement expérimental des glaçons croît. Cette augmentation pourrait être une conséquence du processus physique expliqué précédemment. La valeur moyenne de l'espacement expérimental des glaçons est égale à 20mm. Elle est identique à celle estimée expérimentalement par Makkonen et Fujii (1993).

Contrairement aux résultats expérimentaux présentés à la Figure 35, la température ambiante a une faible influence ou quasi inexistante sur l'espacement numérique des glaçons. L'espacement des glaçons pour le modèle numérique est de l'ordre de 17mm. Cette différence aussi bien qualitative que quantitative entre les résultats numériques et expérimentaux pourrait s'expliquer par une surestimation de l'influence de la température de l'air ambiant dans le modèle morphogénétique.

## 5.2 Influence de l'intensité des précipitations

Les conditions expérimentales des tests pratiques pour examiner l'influence de l'intensité des précipitations sur le processus sont présentées au Tableau 6 du Chapitre 4. Les conditions invariantes sont : la température de l'air ambiant, -5°C ; la vitesse du vent,

4,7m/s ; la durée du givrage, 1h ; l'angle d'inclinaison du cylindre, 0°. L'intensité des précipitations varie de 43 à 65mm/h. Au-delà de cet intervalle, il est difficile de générer des précipitations froides stables à cause des limites technologiques du système de génération de pluies. Celui-ci est limité par le débit de l'eau et la pression d'air admissibles. Lorsque ces grandeurs atteignent leurs limites permises par le système, l'approvisionnement uniforme des gicleurs en eau s'estompe. L'approvisionnement uniforme est une condition sine qua non à la validité des tests expérimentaux. Ceci explique le nombre réduit de points sur les figures relatives à l'influence de l'intensité des précipitations. Les résultats des simulations numériques présentés aux Figures 36 et 37, peuvent être représentés par les fonctions mathématiques définies par les Équations (5.6), (5.7), (5.8) et (5.9).

Pour  $43\text{mm/h} \leq P_a \leq 65\text{mm/h}$ .

$$M_E(P) = -0,000009917P^3 + 0,0007846P^2 + 0,012869P \quad (5.6)$$

$$M_N(P) = 0,0003079P^3 - 0,05019P^2 + 2,687P - 44,69 \quad (5.7)$$

Avec  $M_E$  et  $M_N$  exprimés en kg/m.  $P$  (mm/h), est l'intensité des précipitations. Les indices  $E$  et  $N$  désignent respectivement expérience et numérique. La longueur des glaçons est exprimée par :

$$L_E(P) = -0,0006418P^3 + 0,09601P^2 - 4,797P + 91,06 \quad (5.8)$$

$$L_N(P) = 0,003645P^3 - 0,6091P^2 + 33,11P - 560,1 \quad (5.9)$$

Avec  $L_E$  et  $L_N$  exprimés en cm.

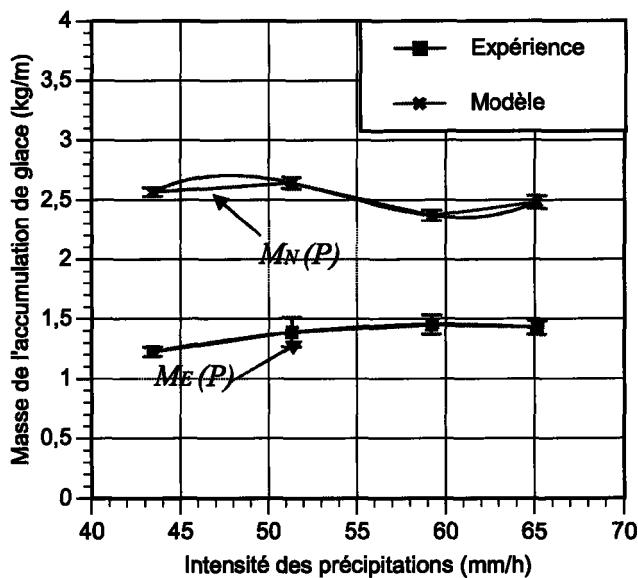


Figure 36: Influence de l'intensité des précipitations sur la masse de glace accumulée.  
 Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; Température de l'air ambiant -5°C ;  
 vitesse du vent 4,7m/s ; durée de l'accumulation 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.  
 Écart-type numérique 0,04kg ; Écart-type expérimental 0,7kg.

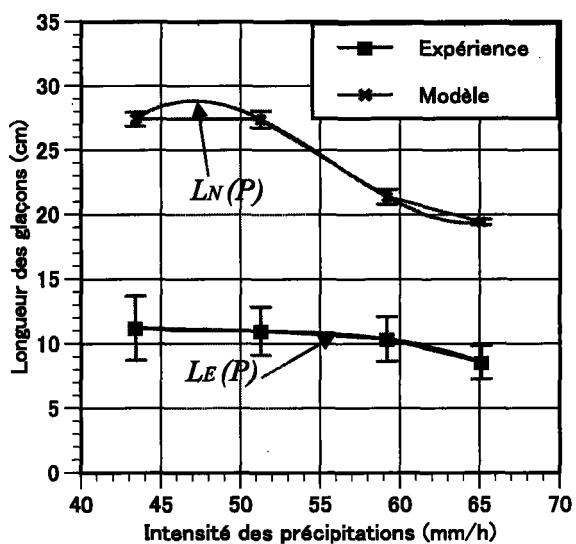


Figure 37: Intensité des précipitations sur la longueur des glaçons. Conditions standard :  
 diamètre du cylindre 35mm ; Température de l'air ambiant -5°C ; vitesse du vent  
 4,7m/s ; durée de l'accumulation 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°. Écart-type  
 numérique 0,5cm ; Écart-type expérimental 1,8cm.

La masse expérimentale de l'accumulation de glace augmente avec l'intensité des précipitations de 43 à 59mm/h. Par contre, il y a une augmentation de la masse numérique de 43 à 51 mm/h. En effet, l'on observe un taux de croissance expérimental de la masse de glace de l'ordre de 0,01kg/mm/h. Ce taux d'augmentation est de 0,02kg/mm/h pour les simulations numériques. Cette augmentation expérimentale est suivie par une décroissance de la masse de glace accumulée lorsque l'intensité des précipitations croît. Une toute autre tendance est observée pour les résultats numériques. Dans le givrage numérique, la croissance de la masse est suivie d'une diminution, qui à son tour est suivie d'une augmentation de la masse accumulée lorsque l'intensité des précipitations croît.

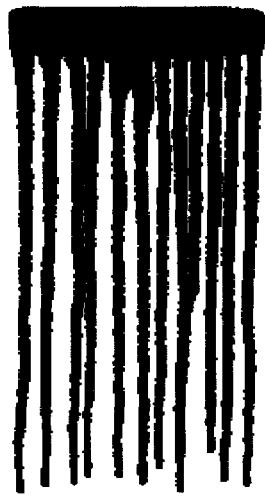
La succession de ces variations pourrait s'expliquer comme suit. L'augmentation de la masse est due à la quantité d'eau apportée par les précipitations verglaçantes qui gèle à la surface du cylindre recouvert de glace. Le flux de chaleur vers l'air est assez important pour entraîner la congélation d'un grand nombre de particules liquides interceptées. La valeur maximale de la masse est plus rapidement atteinte dans le modèle numérique, à cause de la surestimation de l'influence de la température ambiante sur le processus du givrage.

Lorsque l'intensité des précipitations continue d'augmenter, il se forme une importante quantité d'eau à la surface du cylindre recouvert de glace. Par conséquent, l'augmentation de la capacité calorifique du film d'eau à la surface de l'ensemble de la structure entraîne un accroissement du temps nécessaire pour qu'il gèle en totalité. L'égouttement se fait alors assez rapidement sous l'action du vent et de la gravité terrestre. Ceci expliquerait la diminution de la masse accumulée. La quantité effective de l'eau interceptée par le cylindre

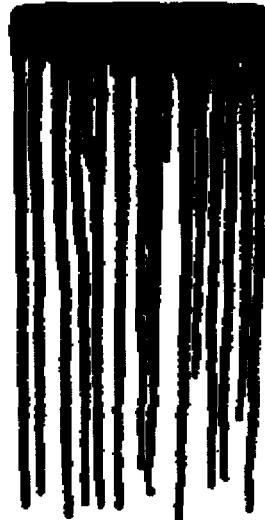
recouvert de glace est plus importante dans le modèle morphogénétique car le phénomène d'éclaboussure est ignoré. Par ailleurs, aucun modèle existant ne le prend en compte. Il s'agit là d'un processus fort complexe. La présence de l'importante masse d'eau à la surface de la structure entraîne un raccourcissement des glaçons.

Lorsque l'intensité des précipitations est élevée et accompagnée de températures ambiantes proches de 0°C, la longueur des glaçons est inversement proportionnelle à l'intensité des précipitations. En effet, la masse d'eau ruisselante mettra plus temps pour geler. Celle-ci aura alors tendance à quitter l'ensemble de la structure sous l'effet de la gravité terrestre, accentuant ainsi l'égouttement. Ce processus a pour effet de diminuer la longueur des glaçons par rapport aux intensités de précipitations plus faibles, car la masse d'eau ruisselante moins importante aura besoin de peu de temps pour geler au bout des glaçons. Ceci entraîne l'augmentation de la longueur des glaçons.

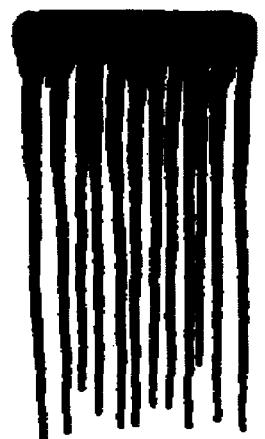
Le taux expérimental de la diminution des glaçons est de 0,054cm/mm/h, de 43 à 59mm/h, Figure 37. Cette baisse s'accentue pour atteindre 0,31cm/mm/h au-delà de 59mm/h. Quant au modèle morphogénétique, il présente une première décroissance de 0,00046cm/mm/h de 43 à 51mm/h pour ensuite s'élever à 0.76cm/mm/h de 51 à 59 mm/h. La source éventuelle de ces écarts est la surestimation de l'influence de la température de l'air ambiant par le modèle morphogénétique tel que mentionné précédemment.



38a. 43mm/h (angle d'impact : 38°)



38b. 51mm/h (angle d'impact : 39°)



38c. 59mm/h (angle d'impact : 40°)



38d. 65mm/h (angle d'impact : 42°)

**Figure 38:** Vue de face des accumulations de glace obtenues numériquement pendant l'étude de l'influence de l'intensité des précipitations sur l'accumulation de glace - modèle morphogénétique. Conditions standard : diamètre du cylindre non toronné 35mm ; longueur du cylindre non toronné 0,2m ; température de l'air ambiant -5°C ; vitesse du vent 4,7m/s ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.



39a. 43 mm/h (angle d'impact des gouttelettes: 38°)



39b. 51 mm/h (angle d'impact des gouttelettes : 39°)



39c. 59mm/h (angle d'impact des gouttelettes: 40°)



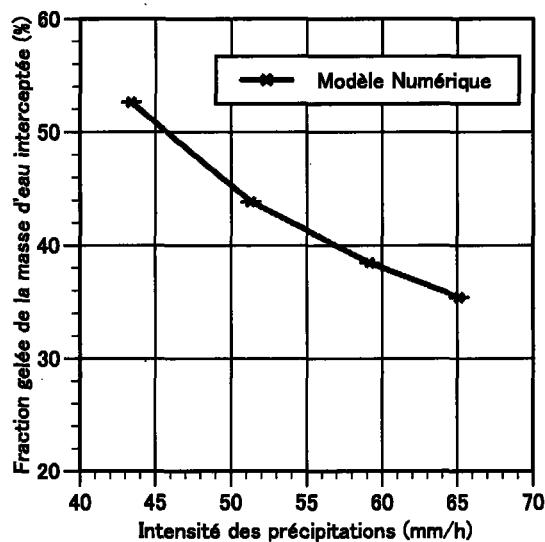
39d. 65mm/h (angle d'impact des gouttelettes: 42°)

**Figure 39:** Influence de l'intensité des précipitations sur l'accumulation de glace. Conditions standard : diamètre du cylindre toronné 35mm ; longueur du cylindre toronné 1m ; température de l'air ambiant -5°C ; vitesse du vent 4,7m/s ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 0°. La partie supérieure de la barre de métal, limitée un ruban noir, a une longueur de 5cm.

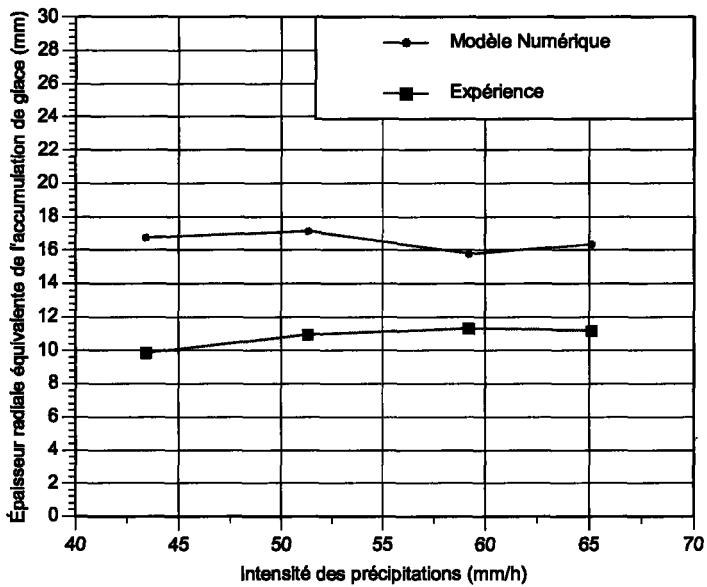
La diminution de la longueur des glaçons se fait plus rapidement dans le modèle morphogénétique. L'efficacité de collecte des gouttelettes étant égale à l'unité dans le modèle numérique, la masse effective d'eau interceptée est plus élevée. Par conséquent, l'égouttement se fait plus rapidement sous l'action de la gravité et du vent. Pour résumer, une augmentation de l'intensité des précipitations entraîne une diminution de la longueur des glaçons. Les formes numériques et expérimentales de l'accumulation de glace en fonction de l'intensité des précipitations, sont présentées aux Figures 38 et 39

respectivement. Nous observons une ressemblance au niveau des formes de l'accrétion et de la formation de glaçons.

La fourniture excessive d'eau qui traduit de fortes intensités de précipitations a un impact sur la fraction gelée de la masse d'eau interceptée, Figure 40. Une augmentation de l'intensité du délestage entraîne une diminution de la fraction d'eau qui gèle. La diminution de la fraction gelée avec l'intensité des précipitations est due à l'importante masse d'eau présente sur l'ensemble de la structure. Une grande partie de cette eau est perdue par délestage, avant qu'elle ne gèle, car sa capacité calorifique est élevée. L'influence de l'intensité des précipitations sur la masse de glace accrétée, présentée à la Figure 36, peut être aussi représentée par la variation de l'épaisseur radiale équivalente, voir Figure 41.



**Figure 40:** Influence de l'intensité des précipitations sur la fraction gelée de la masse d'eau interceptée. Conditions standard idem à celles de la Figure 39.



**Figure 41:** Influence de l'intensité des précipitations sur l'épaisseur radiale équivalente de l'accumulation de glace. Conditions standard idem à celles de la Figure 39. Écart-type numérique 0,2mm.

Il y a une irrégularité de la longueur expérimentale et numérique des glaçons. Lorsqu'il y a formation de glaçons sous un conducteur après une pluie verglaçante, les dendrites de glace n'ont pas la même longueur. Sous le conducteur, l'on aurait pu s'attendre à un rideau de glace compacte, au lieu d'avoir la formation de glaçons. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Bruyn (1977) selon lesquelles l'espacement des glaçons est entièrement dû à une instabilité de type *Rayleigh-Taylor* entre deux couches de fluides de densités différentes, Taylor (1950). Dans notre cas, il s'agit de l'eau et de l'air. Cette théorie est appuyée par les espaces qu'on observe entre les glaçons sous les conducteurs de phase ou les câbles de garde après les tempêtes de verglas. Ce phénomène physique est naturellement émulé par le modèle numérique morphogénétique.

L'espacement des glaçons en fonction de l'intensité des précipitations est présenté à la Figure 42. La variation expérimentale de l'espacement des glaçons est qualitativement identique à la variation numérique. Il y a dans un premier temps une réduction de l'espace entre les glaçons lorsque l'intensité des précipitations croît. Une augmentation supplémentaire de l'intensité des précipitations, entraîne une légère augmentation de l'espacement des glaçons, aussi bien expérimentalement que numériquement. Le rapprochement des glaçons est dû à l'augmentation de la masse d'eau pendante qui provoque la formation d'un plus grand nombre de glaçons. Étant donné que la longueur du cylindre est constante, l'espace entre les glaçons, se réduit. Lorsque l'intensité des précipitations continue d'augmenter, la masse d'eau pendante croît et l'égouttement devient plus rapide. La genèse de certains glaçons est avortée, réduisant ainsi le nombre de glaçons. Ceci explique l'augmentation de l'espacement des glaçons lorsque l'intensité continue d'augmenter. Les fonctions mathématiques de l'espacement des glaçons en fonction de l'intensité des précipitations peuvent s'exprimer comme suit :

$$E_E(P) = 0,006654P^3 - 1,06P^2 + 55,36P - 923,6 \quad (5.10)$$

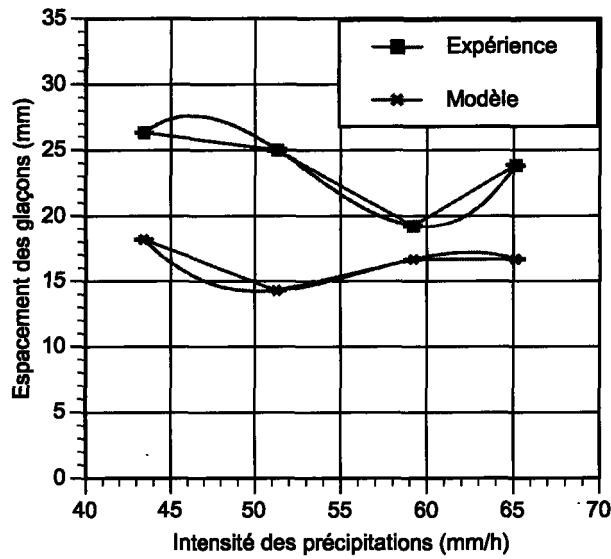
$$E_N(P) = -0,003324P^3 + 0,5621P^2 - 31,32P + 590,3 \quad (5.11)$$

Avec  $E_E$  et  $E_N$  exprimés en mm.  $P$  (mm/h), est l'intensité des précipitations ; les indices  $E$  et  $N$  désignent respectivement expérience et numérique. Il existe un écart au plan qualitatif entre les résultats expérimentaux et numériques. En effet, les glaçons sous le cylindre sont plus proches les uns des autres dans les résultats numériques, donc plus de glaçons. La

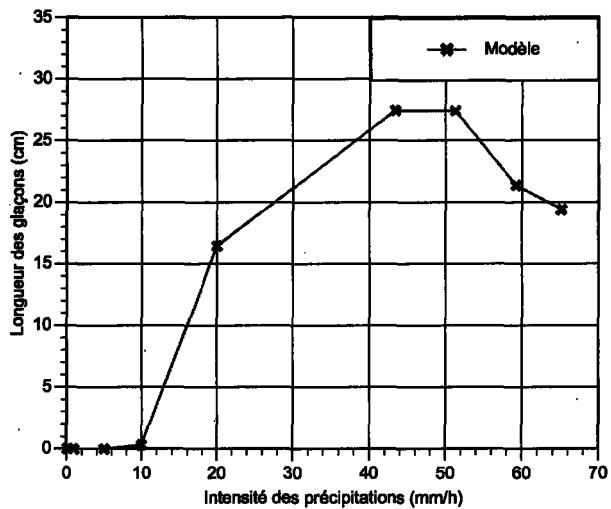
formation des glaçons est en grande partie due au film d'eau qui ruisselle le long des surfaces latérales du cylindre recouvert de glace. Des intensités de précipitations élevées entraînent le ruissellement d'une grande quantité d'eau à cause de sa capacité calorifique qui devient plus importante. Cette masse d'eau (qui ruisselle) et qui a besoin de plus de temps pour geler est entraînée vers le bas du cylindre sous l'action de la gravité terrestre et du vent. Cette masse est plus importante dans le modèle numérique à cause de la non-consideration du phénomène d'éclaboussure, les résultats numériques présentent un nombre de glaçons plus important. Le nombre de glaçons étant inversement proportionnel à l'espacement des glaçons, la courbe numérique est en dessous de la courbe expérimentale tel que présenté à la Figure 42.

Comme nous l'avons mentionné dans les paragraphes précédents, les intensités de précipitations, produites par le dispositif expérimental, sont très élevées par rapport aux valeurs naturelles. Ces intensités ont été utilisées comme entrées du modèle morphogénétique afin de faire une étude comparative. Toutefois, il est intéressant d'examiner le comportement du modèle morphogénétique pour des intensités de précipitations réalistes, voir Figure 43.

La longueur des glaçons augmente avec l'intensité des précipitations pour des intensités inférieures à 43mm/h tel qu'indiqué à la Figure 43. La masse de glace augmente avec l'intensité des précipitations pour de faibles intensités de précipitations. Ce comportement est en accord avec les processus physiques énoncés pour la Figure 36. Une intensité de précipitations croissante, pour de faibles intensités, est synonyme d'une augmentation de la quantité de gouttelettes interceptées qui entraîne une augmentation de la masse de glace.



**Figure 42: Influence de l'intensité des précipitations sur l'espacement des glaçons.**  
 Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; température de l'air ambiant -5°C ; vitesse du vent 4,7m/s ; durée de l'accumulation 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 0°.



**Figure 43: Influence de l'intensité des précipitations sur la longueur des glaçons.**  
 Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; température de l'air ambiant -5°C ; vitesse du vent 4,7m/s ; durée de l'accumulation 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 0°.

Il y a apparition de glaçons pour des intensités de précipitations supérieures à 10mm/h, Figure 43. La longueur des glaçons augmente lorsque les intensités de précipitations continuent de croître, car l'approvisionnement en eau augmente avec l'intensité des précipitations. Les glaçons atteignent leur longueur maximale à 43mm/h. La décroissance de la longueur des glaçons qui succède à cette augmentation est due au processus de délestage. En effet, lorsque l'intensité des précipitations augmente, la masse critique de l'eau pendante est atteinte plus rapidement. Par conséquent, elle se libère de la surface du cylindre recouvert de glace. Ceci entraîne une diminution de la longueur des glaçons. Des simulations supplémentaires ont été effectuées en vue d'examiner la sensibilité du modèle morphogénétique à la variation de la durée et de l'intensité des précipitations pour une même quantité de précipitations donnée. Autrement dit, la quantité de précipitations est constante, seules l'intensité des précipitations et la durée de l'accumulation varient. Les entrées des simulations sont présentées au Tableau 8. Les résultats des simulations numériques sont indiqués à la Figure 44. Au-delà de 20 mm/h, la masse de glace accumulée diminue avec une réduction de la durée du givrage. Cette baisse de la masse de glace accrétée est due à l'intensité élevée des précipitations qui alimente de façon excessive le film d'eau à la surface du cylindre. Une grande part de cette masse d'eau excessive va atteindre la pointe des stalactites de glace et s'égoutter avant qu'elle ne gèle compte tenu de sa capacité calorifique relativement élevée.

Le modèle morphogénétique est sensible à la variation de l'intensité des précipitations et la durée de l'accumulation. En effet, nous aurions obtenue une ligne horizontale à la Figure 44 si le modèle numérique dépendait de la quantité des précipitations. Bien que la quantité

de précipitations soit la même dans chacune des simulations, c'est-à-dire 59 mm, les masses de glace accumulée pendant les simulations sont différentes les unes des autres. En effet, les flux thermiques sont différents dans ces cas. Ceci dénote que l'accumulation numérique morphogénétique de la glace dépend de l'intensité des précipitations et non de leur quantité. Cette sensibilité du modèle morphogénétique est en accord avec la norme 60826 de la commission électrotechnique internationale qui stipule que pour estimer l'accumulation de glace causée par des pluies verglaçantes, il faudrait tenir compte de leur intensité et de leur durée.

Durée des précipitations (heure)	Intensité des précipitations (mm/h)
1	59,21
2	29,61
3	19,74
4	14,8
5	11,84
6	9,87
7	8,46
59	1

Tableau 8: Les valeurs des intensités des précipitations et des durées du givrage pour une même quantité de précipitations égale à 59mm/h.

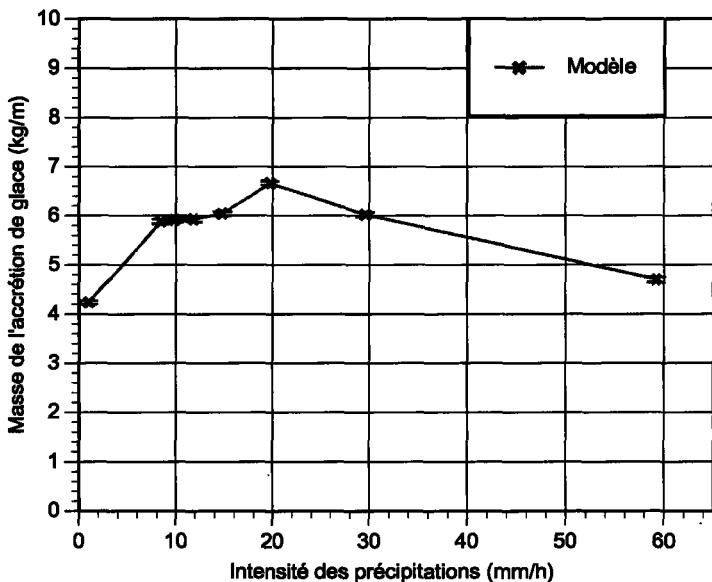


Figure 44: Influence de la quantité de précipitations sur la masse de glace accumulée. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; température de l'air ambiant -5°C ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'inclinaison du cylindre 0° ; quantité de précipitations, 59mm.

### 5.3 Comparaison du modèle morphogénétique avec des modèles existants

Cette section fait une comparaison de résultats de simulations numériques des conditions atmosphériques d'une partie de la journée du 5 janvier 1998. Seulement une partie de la tempête est prise en considération à cause des limites des ressources informatiques utilisées pour les simulations numériques. Les données atmosphériques proviennent de la station météorologique St- Hubert. Le choix de cette date et de cette station météorologique n'est pas fortuit. En effet, du 4 au 10 janvier 1998, l'attention du pays entier s'est portée sur l'évolution d'un phénomène météorologique que l'on qualifiera finalement de «pire

(verglas) qu'ait connu le Canada de mémoire d'homme»<sup>12</sup>. Cette station est située dans l'espace touché par la dite tempête. Une partie des conditions atmosphériques issues de la station St-Hubert est présentée au Tableau 9.

Jour*	Heure du jour	Température de l'air ambiant (°C)	Vitesse du vent (m/s)	Quantité de précipitations (mm)
5	5	-7,9	5,28	0,06
5	6	-6,3	3,61	0,00
5	7	-5,0	5,56	1,01
5	8	-4,9	6,11	1,01
5	9	-4,6	5,28	1,01
5	10	-5,7	4,72	1,01
5	11	-6,0	4,72	1,01
5	12	-6,2	4,16	1,01
5	13	-5,5	3,05	1,01
5	14	-5,4	5,28	1,01

Tableau 9: Conditions atmosphériques simulées

Ces conditions ont été simulées par chacun des modèles choisis pour l'étude comparative. Les résultats de simulations numériques morphogénétiques ont été comparés aux résultats issus de simulations des mêmes conditions atmosphériques (Tableau 9) par les modèles existants à l'étude, à savoir les modèles de Jones (1996b), de Chainé et Castonguay (1974) et de Goodwin et al. (1983). La charge du verglas est généralement exprimée en poids par unité de longueur (N/m), ou en épaisseur radiale équivalente du manchon de glace (mm) entourant les conducteurs de phase ou les câbles de garde,

<sup>12</sup> *David Phillips, climatologue principal et expert-résident de ces questions au Service de l'environnement atmosphérique d'Environnement Canada. La pire tempête de verglas de l'histoire canadienne.*  
[http://www.tor.ec.gc.ca/events/icestorm98/icestorm98\\_the\\_worst\\_f.html](http://www.tor.ec.gc.ca/events/icestorm98/icestorm98_the_worst_f.html)

Commission Électrotechnique Internationale (2003). Les résultats des simulations sont présentés à la Figure 45.

Contrairement aux modèles cités, le modèle morphogénétique ne pose pas une hypothèse de forme de l'accumulation de glace. Il l'a prédit plutôt. L'intensité du givrage est uniforme sur toute la longueur du cylindre, comme les modèles de Goodwin et al. (1983) ; de Jones (1996b) ; et de Chaîné et Castonguay (1974). Les conditions atmosphériques, du Tableau 9, utilisés comme entrées des modèles, définissent un régime sec d'accumulation de glace pour le modèle morphogénétique. En effet, toutes les gouttelettes interceptées gèlent. Autrement dit, il n'y a pas délestage et pas de formation de glaçons. Les épaisseurs radiales équivalentes qui ont été obtenues par le modèle morphogénétique sont légèrement inférieures à celle de Jones (1996b), voir Figure 45, nonobstant que la forme de l'accrétion de glace soit totalement différente. En effet, la Figure 46 montre que la glace s'est préférentiellement accrétée sur la surface du cylindre en regard de la trajectoire des particules liquides, contrairement au modèle de Jones (1996b) qui suppose une distribution uniforme de la glace. La forme de l'accrétion de la glace observée à la Figure 46 montre la capacité du modèle morphogénétique à simuler une accumulation de glace non uniforme.

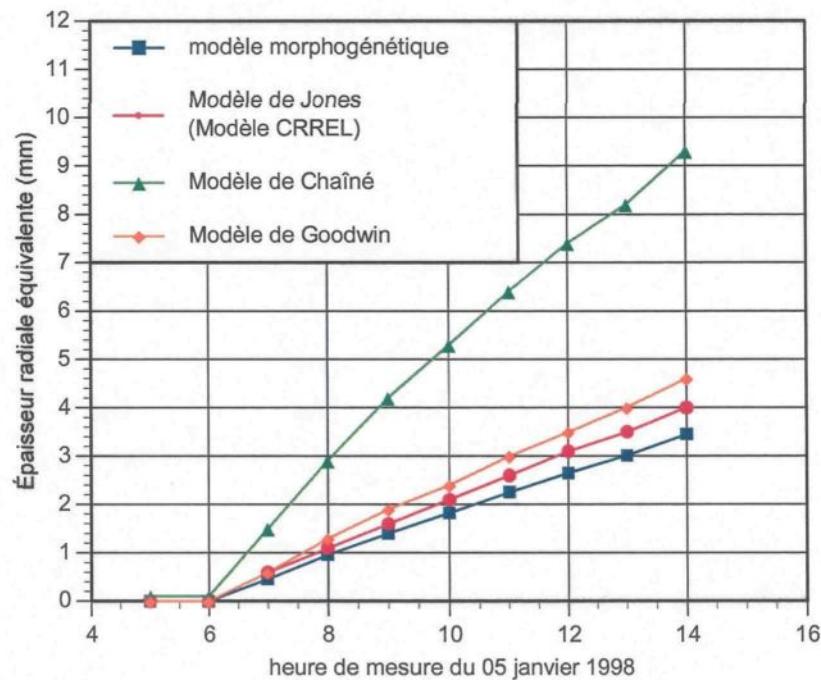


Figure 45: Épaisseurs uniformes radiales équivalentes (mm) issues des simulations des conditions atmosphériques indiquées au Tableau 9, diamètre du cylindre, 25,4mm ; longueur du cylindre 0,2m.



Figure 46: Forme de l'accrétion de glace obtenue numériquement par le modèle morphogénétique. Givrage d'un cylindre soumis pendant 10h aux conditions atmosphériques indiquées au Tableau 9, diamètre du cylindre, 25,4mm ; longueur du cylindre 0,2m, volume d'une particule liquide 1mm<sup>3</sup>.

La masse de glace obtenue par les simulations du modèle morphogénétique est inférieure à celles obtenues par les modèles de Goodwin et al. (1983) et de Jones (1996b). L'écart entre la variation de l'épaisseur radiale équivalente dans les modèles de Goodwin et al. (1983) et de Jones (1996b) est faible. En effet, les variations de l'épaisseur radiale équivalente dans le modèle morphogénétique, de Goodwin et al. (1983), de Jones (1996) sont respectivement égales à 0,43, 0,50 et 0,56mm/h. Ces taux de variation représentent les moyennes sur la période de l'accumulation. Aux premières heures, l'écart entre les épaisseurs radiales équivalentes est assez faible et croissant au fur et à mesure qu'on avance dans le temps.

Au terme des dix heures de givrage, les épaisseurs radiales équivalentes obtenues par les modèles de Jones (1996b), Goodwin et al. (1983) et de Chainé et Castonguay (1974) sont respectivement supérieures à celles simulées par le modèle morphogénétique dans une proportion de 15, 33 et 169%.

Les résultats des modèles de Jones (1996b), et de Goodwin et al. (1983) sont relativement proches. Il s'agit essentiellement du même modèle. Par contre, ils utilisent différentes vitesses terminales pour les gouttelettes d'eau. Ces dernières ont une vitesse de chute plus faible dans le modèle de Goodwin et al. (1983) que dans celui de Jones (1996b). Par conséquent, il y a un plus grand flux massique dû à l'action du vent qui conduit à une masse de glace quelque peu élevée dans le modèle de Goodwin et al. (1983) par rapport à celui de Jones (1996b).

Notons aussi que, ces deux modèles ont posé comme hypothèse de départ une forme cylindrique de l'accumulation de glace, contrairement au modèle de Chainé et Castonguay (1974) qui suppose une forme elliptique. Aux premières heures de la tempête de verglas, il y a un écart considérable entre l'épaisseur radiale équivalente numérique et celle du modèle de Chainé et Castonguay (1974). Cet écart augmente au fil du temps. En effet, le taux de croissance de l'épaisseur radiale équivalente de l'accrétion de glace pour le modèle de Chainé et Castonguay (1974) est de l'ordre de 1,16mm/h. Cela représente plus du double de pour le modèle morphogénétique qui est de 0,43 mm/h. Cette différence pourrait découler de la méthode empirique utilisée par Chainé et Castonguay (1974) pour estimer le facteur de forme  $K$  dans leur modèle. En effet,  $K$ , a été empiriquement déterminé à partir d'expériences réalisées, par Stallabrass et Hearty (1967), dans une soufflerie, pour le givrage marin. Les expériences qui ont été réalisées avec des valeurs de vitesse de vent et de teneur en eau liquide sont relativement élevées par rapport aux conditions rencontrées au cours des pluies verglaçantes.

#### 5.4 Tentative de rapprochement des résultats numériques et expérimentaux

Dans les sections précédentes, il s'est agit de faire une comparaison qualitative et quantitative des résultats expérimentaux et numériques. Cette étude comparative a montré un écart d'ordre quantitatif. Il y a une surestimation de la masse et de la longueur des glaçons de l'accrétion de glace. L'objectif de cette section est de savoir sur quel paramètre du modèle morphogénétique pourrions-nous agir pour de rapprocher les résultats numériques des résultats expérimentaux. Les paramètres du modèle numérique concernés

par cette tentative de rapprochement sont, la probabilité de congélation, le paramètre de délestage et l'efficacité de collecte des gouttelettes d'eau. L'un de ces paramètres conserve sa valeur calculée durant tout le processus d'accumulation, tandis que le second est muni d'un facteur multiplicateur tout en faisant varier la température de l'air ambiant. Les Figures 47 et 48 présentent respectivement l'influence de la variabilité du paramètre de délestage sur la masse de l'accrétion et la longueur des glaçons. Les facteurs appliqués, sont 1/10 ; 1/7 ; 1/3 et 3.

Lorsque la température de l'air ambiant varie de -8 à -1°C, les courbes numériques de (1/10) et (1/7) sont proches des résultats expérimentaux, et s'en éloignent pour des températures inférieures à -8°C, voir Figure 47. Quant à la courbe (1/3), elle est légèrement au dessus des résultats expérimentaux de -8 à 1°C, et en dessous de ces résultats pour des températures inférieures à -8°C. La courbe (3) est largement au dessus des résultats expérimentaux. La longueur des glaçons obtenue après la modification du paramètre de délestage est présentée à la Figure 48. Les courbes (1/10), (1/7), (1/3) et (3) sont assez distants des résultats expérimentaux, hormis les courbes (1/10), (1/7) et (1/3) qui s'en rapprochent lorsque les températures ambiantes sont supérieures à -3°C.

L'observation des Figures 47 et 48 montre que la tentative de rapprochement des résultats numériques aux résultats expérimentaux par l'application d'un facteur multiplicateur au paramètre de délestage n'est pas la meilleure technique de rapprochement. Nous observons que la longueur des glaçons est sensible aux variations du paramètre de délestage.

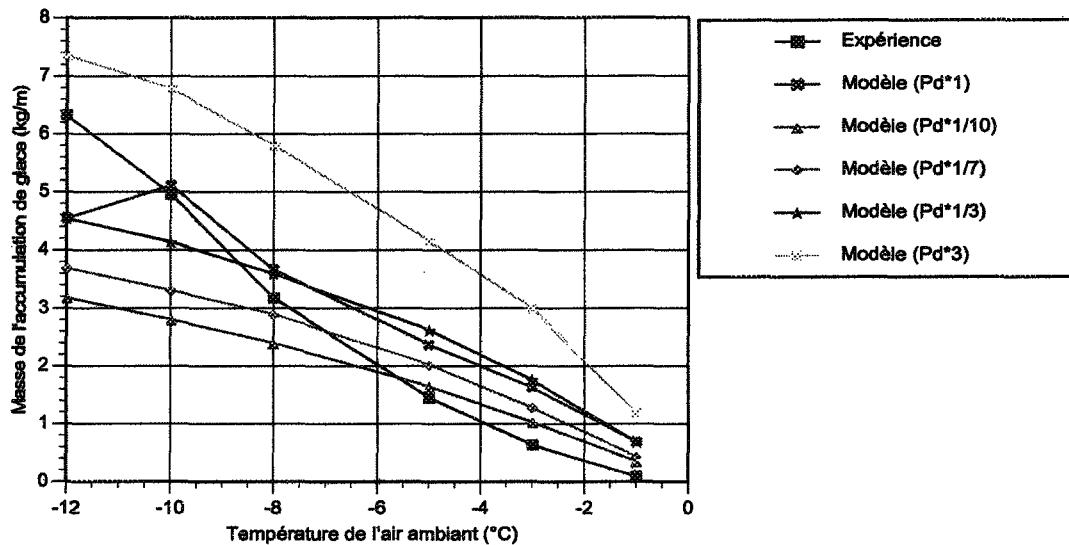


Figure 47: Impact de la modification du paramètre de délestage sur la masse de glace accumulée- Conditions expérimentales standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.

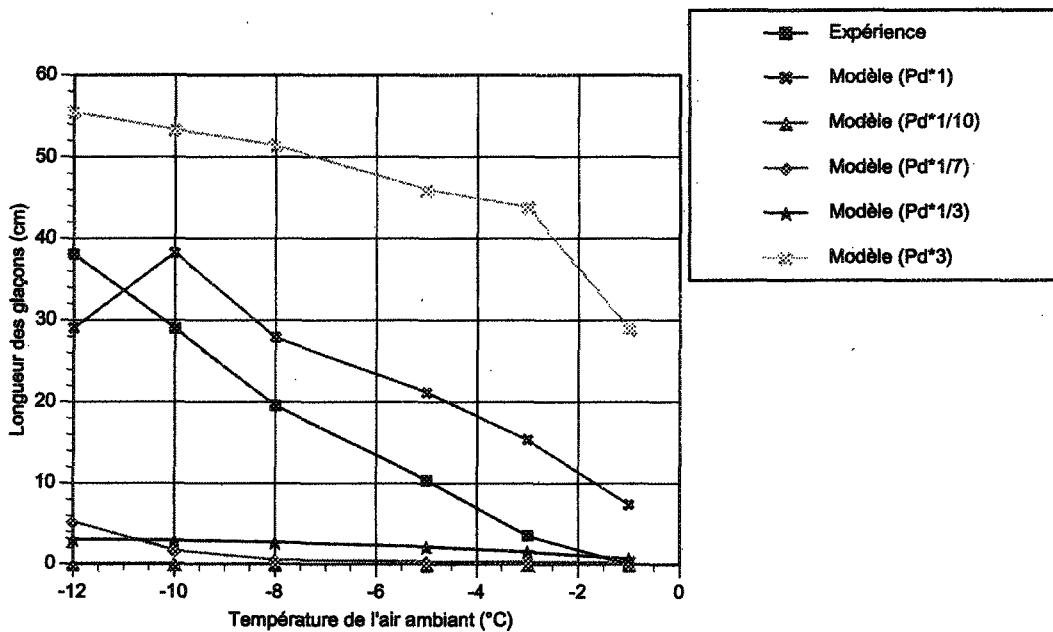


Figure 48: Impact de la modification du paramètre de délestage sur la longueur des glaçons. Conditions expérimentales standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.

Les résultats de la tentative de rapprochement, par l'application d'un facteur multiplicateur à la probabilité de congélation sont présentés aux Figures 49 et 50. Les courbes (1/10), (1/7) sont en dessous de la courbe expérimentale. C'est aussi le cas pour la courbe (1/3) lorsque les températures sont inférieures à -5°C. La courbe (3) est largement au dessus de la courbe expérimentale. L'obtention d'allures différentes dénote la complexité du givrage.

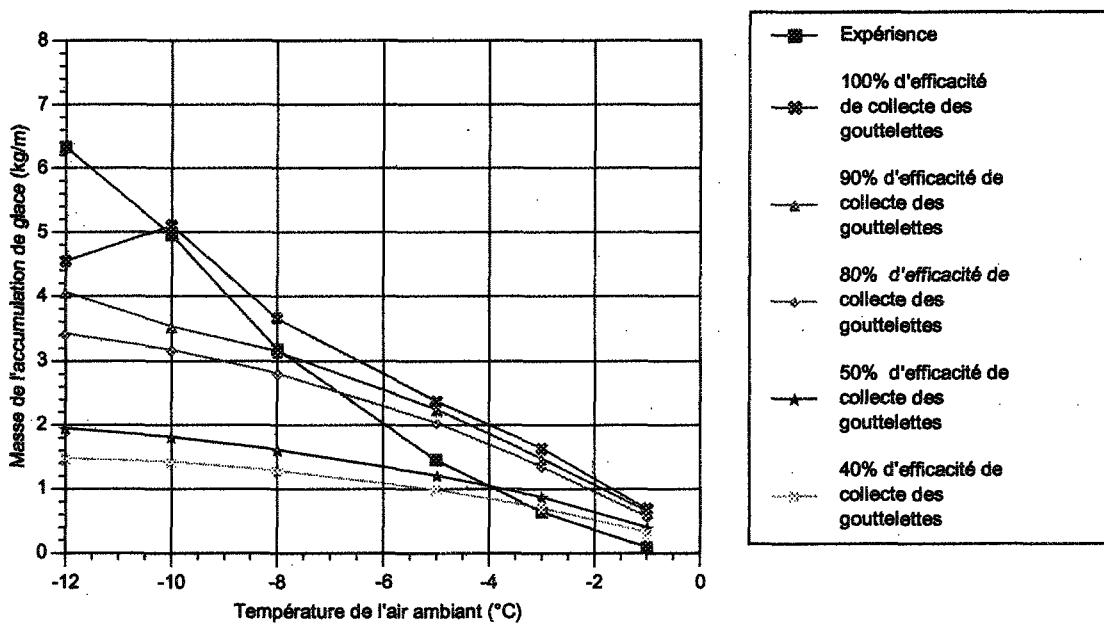


Figure 49: Impact de la modification de la probabilité de congélation sur la masse de l'accumulation. Conditions expérimentales standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.

Les paramètres étant interdépendants, la modification de l'un des paramètres pour rapprocher les résultats numériques et expérimentaux est difficile à réaliser. La probabilité de congélation et le paramètre de délestage qui déterminent l'issue du cheminement aléatoire des particules liquides sont affectés par différents éléments, comme la forme de

l'accumulation de glace par exemple. Il est ardue de définir l'effet de cette forme sur la probabilité de congélation et le paramètre de délestage en terme de facteur multiplicateur.

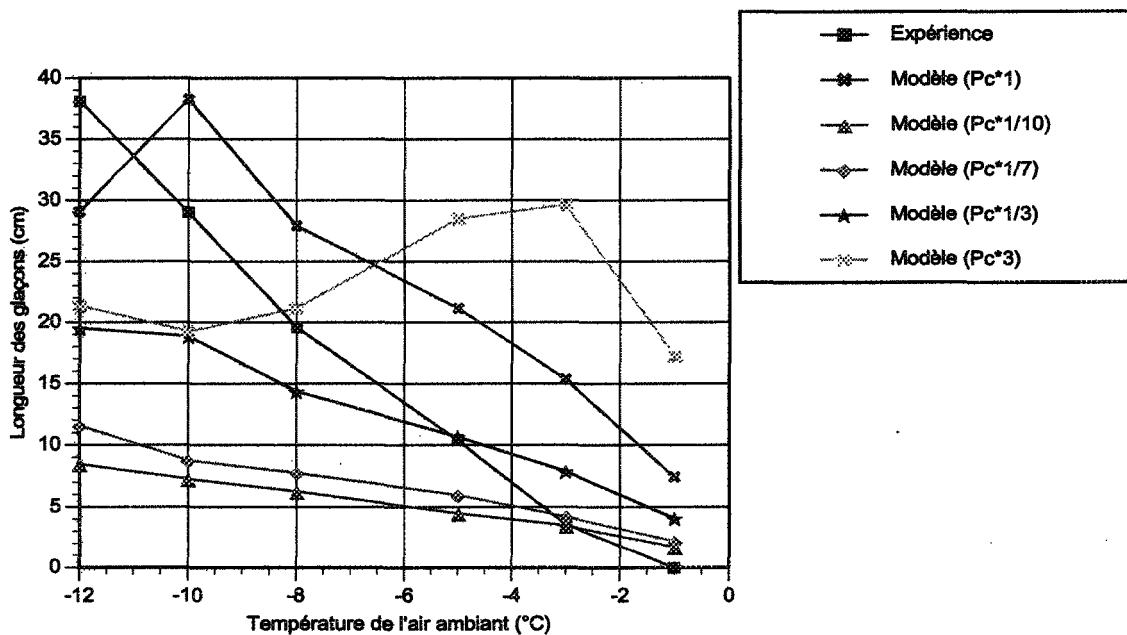


Figure 50: Impact de la modification de la probabilité de congélation sur la longueur des glaçons Conditions expérimentales standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée de l'accumulation 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.

La Figure 51 présente l'influence de l'efficacité de collecte des gouttelettes par le cylindre recouvert de glace, sur le processus d'accumulation de glace. Utiliser des valeurs d'efficacité de collecte des gouttelettes différentes de 1 c'est-à-dire 100% a objectif de simuler le phénomène d'éclaboussure observé à l'impact des gouttelettes d'eau durant les tests pratiques en laboratoire. Lorsque la température de l'air ambiant est supérieur à -8°C, la masse numérique est supérieure à la masse de glace expérimentale accumulée pour une efficacité de collection de 90%. La température ambiante où la courbe expérimentale

numérique se croise augmente lorsque l'efficacité de collecte des gouttelettes diminue. En effet, elle est respectivement de -7, -4 et -3 °C pour 80, 50 et 40% d'efficacité de collecte des gouttelettes. Malgré le point d'intersection des courbes numérique et expérimentale, les masses expérimentales et numériques sont quantitativement différentes. Par conséquent, le rapprochement escompté par une variation de l'efficacité de collecte des gouttelettes n'est pas atteint.

L'observation des Figures 47, 48, 49, 50 et 51 nous incite à dire qu'il est nécessaire de développer une théorie un peu plus complète et réaliste pour soutenir la modélisation morphogénétique de l'accumulation de glace sur un cylindre.

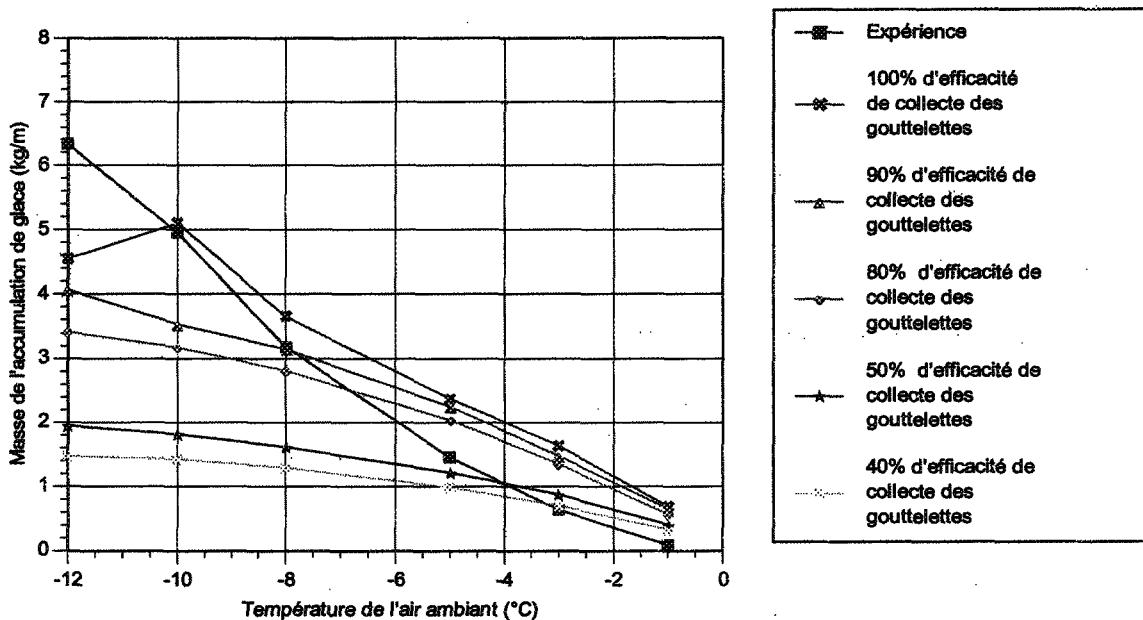


Figure 51: Influence de l'efficacité de collecte des gouttelettes d'eau sur la masse de glace accumulée. Conditions expérimentales standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; angle d'impact des gouttelettes 40° ; durée de l'accumulation 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.

### 5.5 Influence de la flexibilité du conducteur de ligne sur l'accumulation de glace

La Figure 52 présente l'influence de l'angle d'inclinaison du cylindre sur la masse de l'accrétion de glace obtenue par les simulations numériques morphogénétiques. Un angle d'inclinaison qui est égal à  $90^\circ$  traduit un cylindre parfaitement horizontal, voir Figure 15. La diminution de cet angle de  $85$  à  $60^\circ$  entraîne une diminution de la masse de glace accumulée, tandis que de  $90^\circ$  à  $85^\circ$  il y a une augmentation de cette masse.

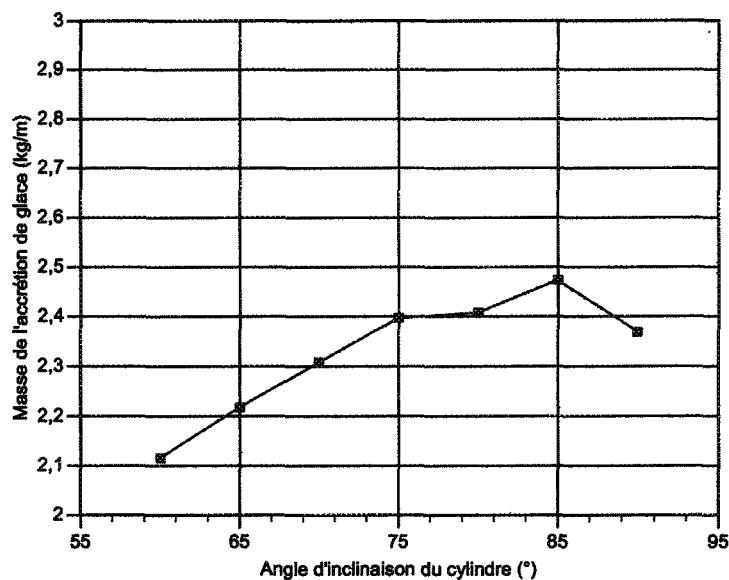
Une proportion des gouttelettes interceptées se déplace dans le sens de l'inclinaison du cylindre accroissant ainsi la distance que doit parcourir les particules liquides interceptées avant d'atteindre le bas de l'accumulation pour des angles compris entre  $85$  à  $90^\circ$ , voir Figure 52. Ceci accroît les chances qu'elles gèlent avant d'être délestées. Le phénomène contraire qui est observé pour les résultats numériques lorsque les angles d'inclinaison sont inférieurs à  $85^\circ$ , peut s'expliquer par le traitement du processus de givrage aux extrémités du cylindre. Lorsqu'une particule liquide atteint l'une de ces extrémités du cylindre recouvert de glace, elle subit un traitement particulier à chaque fois que le nombre aléatoire généré (la génération de nombres aléatoires gouverne son mouvement) l'incite à quitter l'ensemble de la structure.

Dans ce cas particulier, la particule liquide réapparaît dans une cellule vide, située au même niveau que la cellule courante et possédant au moins une cellule adjacente occupée, à l'autre extrémité du cylindre recouvert de glace. L'identification d'une cellule se présente sous la forme, (X, Y, Z). Les cellules situées aux extrémités du domaine sont identifiées par  $Z = 1$  ou  $Z = 200$ . L'exemple suivant explique le traitement particulier présenté au

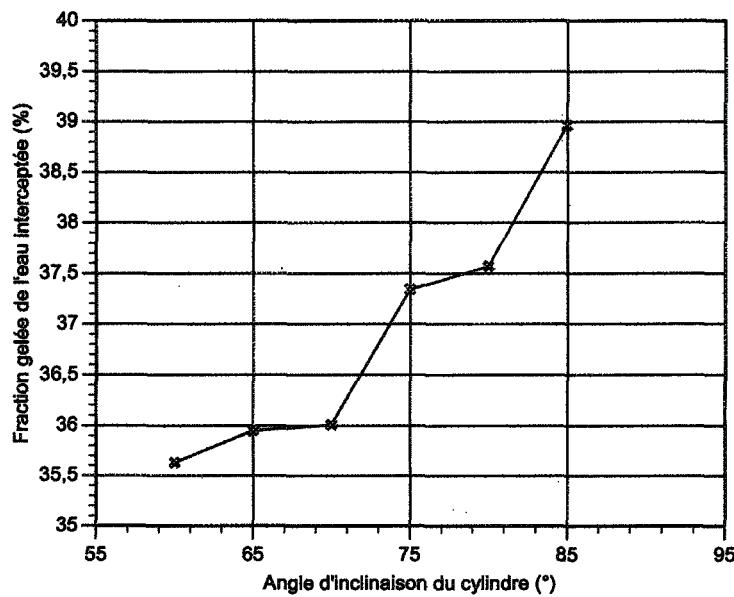
paragraphe précédent. Lorsque dans son cheminement, une particule liquide atteint la cellule ayant les coordonnées (100, 150,1) par exemple, et que son prochain pas l'entraîne en dehors du domaine de simulation, elle doit occuper la cellule qui a les coordonnées (100, 150,200) à condition que cette dernière soit vide avec au moins une cellule adjacente occupée par une partie du cylindre ou une particule de glace. Lorsque ces deux conditions ne sont pas respectées la cellule demeure à la cellule (100, 150,1) et un nombre aléatoire est généré à nouveau. Pour éviter que la particule liquide demeure indéfiniment dans la cellule (100, 150,1), le processus de délestage est enclenché.

Lorsque l'angle d'inclinaison du cylindre diminue, les particules liquides qui n'ont pas gelées atteignent plus rapidement les cellules du domaine dont  $Z=0$ . Après avoir atteint l'extrémité inférieure du cylindre, elles sont soumises au processus de délestage. En atteignant assez rapidement cette partie du domaine, les chances qu'elles quittent le cylindre recouvert de glace par délestage augmente. Ceci peut expliquer la diminution de la masse de la glace accumulée lorsque l'angle d'inclinaison du cylindre baisse tel qu'indiqué à la Figure 52. Les particules liquides interceptées qui sont attirées vers l'extrémité inférieure de l'accrétion de glace, ont plus de chance d'être délestées. Par conséquent l'on observe une diminution de la fraction gelée de l'eau interceptée lorsque l'angle d'inclinaison diminue, voir Figure 53.

Les longueurs réelles des conducteurs de lignes constituent une limite dans la modélisation de leur givrage par la méthode du cheminement aléatoire. Un traitement particulier adéquat aux extrémités du cylindre givré permettrait de prendre en compte les longueurs réelles des conducteurs de lignes de transport d'énergie.



**Figure 52: Influence de l'angle d'inclinaison du cylindre,  $\beta$ , sur la masse de l'accrédition de glace.**  
 Résultats numériques. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; durée du givrage 1h.



**Figure 53: Influence de l'angle d'inclinaison du cylindre,  $\beta$ , sur la fraction gelée de l'eau interceptée.**  
 Résultats numériques. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; intensité des précipitations 59mm/h ; vitesse du vent 4,7m/s ; durée du givrage 1h.

### 5.6 Accumulation de glace sur un cylindre tournant

Cette section traite de l'influence de la vitesse de rotation du cylindre sur le processus d'accumulation de glace. La rotation du cylindre est une amorce de la prise en compte de la flexibilité en torsion des conducteurs de lignes aériennes de transport d'énergie électrique, tel que mentionné au Chapitre 3. L'action du vent et de la gravité terrestre sur les conducteurs recouverts de glace se traduit par leur torsion. Ce projet de recherche traite du premier modèle morphogénétique qui prend en compte l'accumulation de glace sur un cylindre en rotation. Dans cette modélisation, la rotation du cylindre est régulière. Il n'est pas tenu compte de la résistance du couple de torsion du cylindre.

La rotation d'un cylindre et l'accumulation de la glace sont des processus continus. Mais le modèle utilise une approche discrète, en ce sens que le cheminement des gouttelettes se fait de façon séquentielle. Par conséquent, une particule liquide ne peut être libérée avant que le cheminement de la particule liquide courante ne soit achevé par congélation ou par délestage. Dans le modèle, le cheminement d'une particule liquide et la rotation du cylindre ne sont pas simultanés.

Les simulations numériques de l'accumulation de la glace sur un cylindre tournant ont été effectuées avec les paramètres constants suivants : le diamètre du cylindre 35,1mm ; la température de l'air ambiant -3,7°C ; l'intensité des précipitations 1mm/h ; la vitesse du vent 5,28m/s ; la durée de l'accumulation 1h ; l'angle d'inclinaison du cylindre 0°. Ces valeurs ont été choisies arbitrairement parmi les données atmosphériques enregistrées le 6 Janvier 1998 à la station météorologique St Hubert au Canada. Les données atmosphériques

choisies ont été enregistrées au cours de la première heure du 6 janvier 1998. Le choix arbitraire des valeurs est justifié par le fait que cette section ne tient qu'à montrer la capacité du modèle numérique à simuler l'accrétion de glace sur un cylindre tournant.

Les vues de profil des accumulations de glace qui ont été obtenues, sont présentées à la Figure 54 où le cylindre est transparent. Les formes d'accrétions obtenues dénotent la justesse de la technique utilisée. Mais, l'observation des bandes de glace indique que la technique est à raffiner. L'apparition d'une accumulation de glace striée peut s'expliquer par les arrondis réalisés lors de la relocalisation de particules de glace en vue de simuler la rotation du cylindre recouvert de glace. En effet, les résultats des calculs des nouvelles coordonnées des particules de glace en rotation sont des nombres réels à transformer en nombres entiers, car le domaine de simulation ne possède que des coordonnées entières.

Lorsque le cylindre recouvert de glace est en rotation, il entraîne l'accumulation de glace dans son mouvement circulaire. Ce mouvement circulaire a pour effet d'exposer, directement et de manière séquentielle les différentes sections de la surface du cylindre recouvert de glace, à la pluie verglaçante. Les conditions des simulations définissent un régime sec, c'est-à-dire que les particules liquides interceptées gèlent quelque temps après leur impact. Pour un cylindre fixe, la glace devrait préférentiellement s'accumuler sur la surface en regard de la pluie verglaçante, tel que présenté à la Figure 46.

Lorsque le cylindre tourne, la glace s'accumule "uniformément" sur toute la surface à cause du mouvement circulaire. Cela est observé à la Figure 54. La Figure 55 présente une

vue de face des accrétions de glace. Elle confirme l'assertion précédente, soit une distribution "uniforme" de la glace à la surface du cylindre en rotation recouvert de glace.

La Figure 56 présente l'influence de la vitesse de rotation du cylindre sur la masse de l'accrétion de glace. La masse de glace diminue légèrement avec la vitesse de rotation du cylindre, voir Figure 56. Cette diminution de la masse de glace avec la vitesse de rotation du cylindre pourrait être une conséquence de la technique utilisée pour simuler le mouvement circulaire.

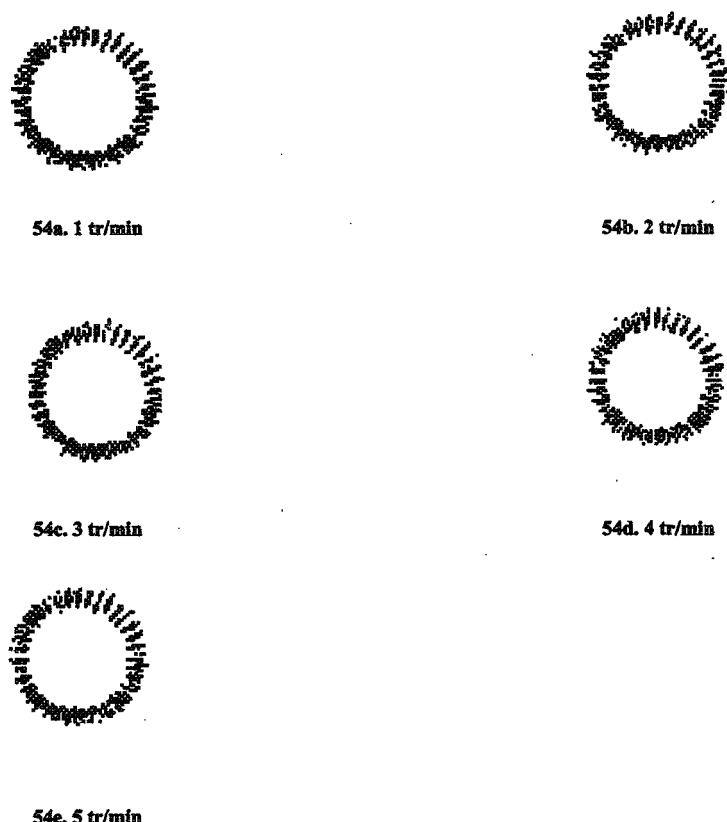
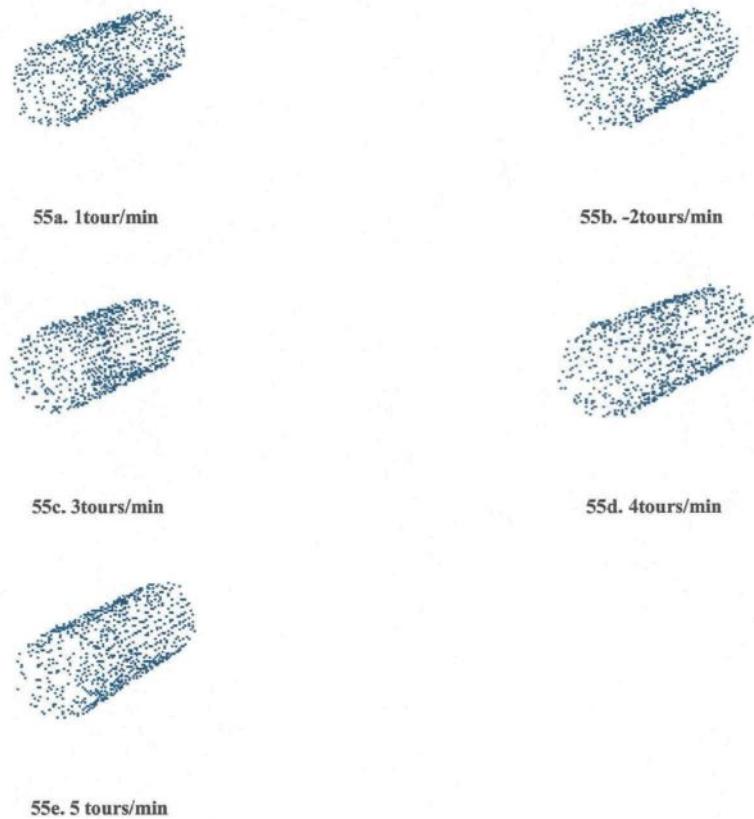


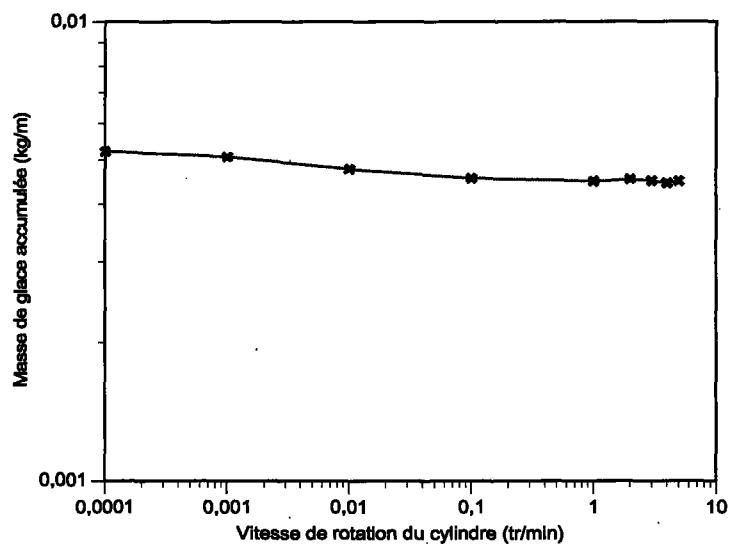
Figure 54 : Vue de profil des accumulations de glace sur un cylindre en rotation. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm (le cylindre est transparent) ; température ambiante -3,7°C ; intensité des précipitations 1mm/h ; vitesse du vent 5,28m/s ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90° ; angle d'impact des particules liquides 42°.



**Figure 55:** Vue de face des résultats numériques du givrage d'un cylindre en rotation. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm (le cylindre est transparent) ; longueur du cylindre non toronné 0,2m ; température ambiante -3,7°C ; intensité des précipitations 1mm/h ; vitesse du vent 5,28 m/s ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.

Comme nous l'avions déjà mentionné, la rotation se fait étape par étape et une étape correspond à un décalage angulaire de 10°. Le domaine de simulation étant un tableau à trois dimensions, les nouvelles coordonnées des particules de glace situées dans des cellules adjacentes posent problème. En ce sens que dans un tableau à trois dimensions, les coordonnées ne sont représentées que par des entiers. Par conséquent, il faut arrondir les

valeurs calculées. Ceci peut occasionner que les nouvelles coordonnées de particules de glace adjacentes soient identiques. Cette technique réduit alors le nombre de particules de glace dans une faible proportion. Lorsque la vitesse de rotation augmente, "la perte des particules" due à cette technique s'accentue. Par conséquent, la masse totale de glace diminue. Pour contourner cette difficulté, il faudrait simuler l'accumulation de glace sur un cylindre tournant dans un domaine cartésien dont les coordonnées sont des nombres réels. Toutefois, les formes de glace obtenues dénotent de la justesse de la technique employée.

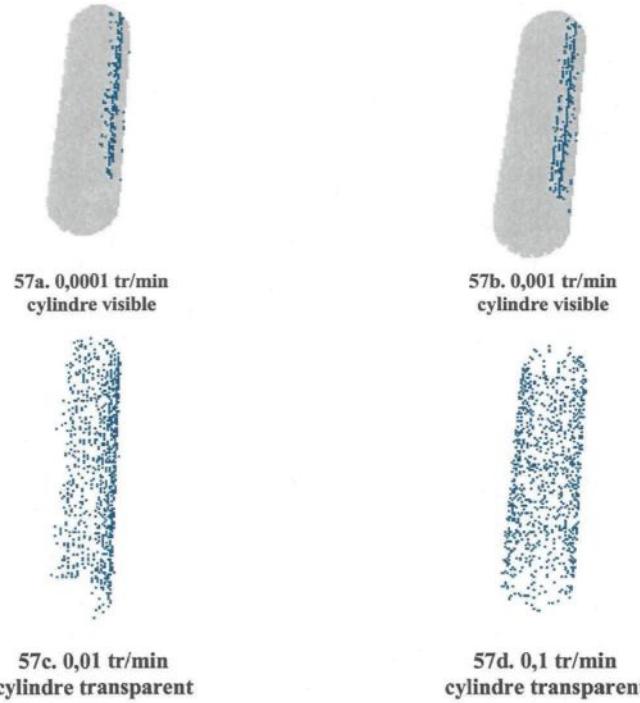


**Figure 56: Régime d'accumulation sec. Influence de la vitesse de rotation du cylindre sur la masse de l'accrétion de glace. Conditions standard : diamètre du cylindre 35.1 mm ; température ambiante -3.7°C ; intensité des précipitations 1mm/h ; vitesse du vent 5.28 m/s ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 90°.**

Les formes de glace obtenues indiquent bien que la technique utilisée pour simuler la rotation du cylindre est adéquate, Figure 57. Lorsque le cylindre ne fait pas un tour complet, toute la surface du cylindre en rotation n'est pas exposée à la pluie verglaçante,

elle ne recouvre pas entièrement de glace, comme présenté aux Figures 57.a-c. La surface cylindrique est entièrement recouverte lorsque le cylindre fait au moins un tour complet.

La Figure 57.d indique bien qu'après avoir fait six tours, le cylindre est entièrement recouvert de glace, car le régime d'accumulation est sec.



**Figure 57:** Vue de dessus des résultats numériques du givrage d'un cylindre en rotation. Conditions standard : diamètre du cylindre 35mm ; longueur du cylindre 0,2m ; température ambiante -3,7°C ; intensité des précipitations 1mm/h ; vitesse du vent 5,28 m/s ; durée du givrage 1h ; angle d'inclinaison du cylindre 0°.

## CHAPITRE VI

### CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le nouveau modèle numérique morphogénétique qui a été élaboré dans ce projet de recherche prédit la morphologie de l'accumulation de glace sur un cylindre non énergisé. Ce cylindre peut simuler des conducteurs de phase et des câbles de garde des lignes aériennes de transport d'énergie. Pour des fins de validation du modèle numérique morphogénétique, nous avons effectué une étude comparative des résultats numériques avec les résultats d'expériences pratiques réalisées dans le laboratoire des précipitations givrantes de la CIGELE. Au terme de la mise en œuvre du modèle numérique morphogénétique et de l'étude comparative, nous résumons dans les paragraphes subséquents, les points forts et les questionnements qui en découlent d'une part. D'autre part, nous présentons les recommandations qui sont suggérées pour améliorer le projet de recherche et les perspectives qu'il présente. Les conclusions et les recommandations sont regroupées selon les différentes étapes de la mise en œuvre du projet, à savoir :

- La modélisation et simulations numériques ;
- Les expériences pratiques en laboratoire ;
- La validation du modèle numérique et les applications pratiques.

## 6.1 Conclusions

### 6.1.1 Modélisation et simulations numériques

- 1) Le modèle morphogénétique, qui a été développé au cours de ce projet de recherche, prédit la forme et la masse de l'accrétion de glace sur un cylindre fixe ou tournant. Il constitue le premier modèle morphogénétique capable de simuler l'accumulation de glace sur un cylindre en rotation.
- 2) La probabilité de congélation et le paramètre de délestage sont exprimés en fonction de l'intensité des précipitations et du flux de chaleur vers l'air. Le paramètre de délestage est inversement proportionnel à la probabilité de congélation.
- 3) Les probabilités de déplacement des particules liquides à la surface du cylindre recouvert de glace ne sont pas basées sur des équations physico-mathématiques du processus de givrage. Le modèle a utilisé des hypothèses simplificatrices.
- 4) Le temps de simulation du modèle numérique avec un ordinateur personnel (Pentium 4, CPU-3GHz, 512 Mo de RAM) va au-delà d'une heure.
- 5) Le modèle numérique morphogénétique simule aisément la formation de glaçons et l'irrégularité de leur longueur. Il pourrait constituer une voie pour l'estimation de l'accumulation de glace pendant les tempêtes de verglas. Dans le modèle numérique, les glaçons se forment lorsque l'intensité des précipitations est supérieure à 10 mm/h pour une température de l'air ambiant égale à -5 °C. En effet, l'on observe le plus souvent des glaçons qu'au cours des tempêtes de verglas.

- 6) La longueur des glaçons et la masse de la glace, accumulée sur le cylindre non énergisé, sont des fonctions polynomiales d'ordre 3 de la température de l'air ambiant (de -12 à -1 °C) d'une part, et de l'intensité des précipitations (de 43 à 65 mm/h) d'autre part dans les conditions stabilisées de la chambre climatique de la CIGELE.
- 7) La technique de la prise en compte de la flexibilité en torsion du cylindre est limitée par le traitement du cheminement aléatoire des particules liquides utilisé aux extrémités du cylindre. Ladite technique a été utilisée pour tenir compte de la longueur du cylindre, mais elle n'est pas adéquate. Les longueurs réelles des conducteurs de lignes constituent une limite pour la modélisation de leur givrage par la méthode du cheminement aléatoire.
- 8) Le modèle morphogénétique développé dans ce projet de recherche indique que l'intensité du givrage dépend de l'intensité des précipitations verglaçantes et non de la quantité des précipitations verglaçantes. Autrement dit, l'accumulation dans le modèle est gouvernée par les flux thermiques.
- 9) Le modèle morphogénétique utilise une approche discrète pour simuler la rotation continue du cylindre dans le domaine de simulation numérique. Ce domaine constitue une limite pour la technique utilisée pour simuler la rotation du cylindre. En effet, la simulation du givrage dans un domaine représenté par un tableau présente des limites lorsqu'il s'agit d'entraîner dans un mouvement circulaire deux particules adjacentes de glace. Les coordonnées finales converties en entier peuvent être égales. La conversion

est nécessaire car les axes du domaine de simulation ne prennent que des nombres entiers comme coordonnées.

### **6.1.2 Expériences dans le laboratoire des précipitations froides**

En pratique, il est difficile de produire des gouttelettes d'eau surfondues et une faible intensité de précipitations (de 1 à 5 mm/h par exemple) dans la chambre climatique utilisée pour cette étude. En effet, les gicleurs gèlent et l'eau peut arrêter de circuler. Ceci explique l'utilisation des intensités élevées de précipitations pour une heure de givrage.

### **6.1.3 Validation du modèle numérique et applications pratiques**

- 1) Il y a une surestimation de la masse de glace par le modèle numérique lorsque la température de l'air est supérieure à -10°C. Cette masse est sous-estimée quand la température est inférieure à -10°C. Les masses de la glace accumulée pendant les simulations numériques et expérimentales sont quasi égales lorsque la température de l'air est à -10°C. Le comportement du modèle numérique vis-à-vis des résultats expérimentaux est idem pour la longueur des glaçons. Par contre, la coïncidence des résultats numériques et expérimentaux se fait à -11 °C.
- 2) Le modèle numérique morphogénétique sous-estime l'espacement entre les glaçons par rapport aux résultats d'essais en laboratoire.
- 3) Il y a une surestimation de la masse et de la longueur des glaçons de l'accumulation de la glace lorsque l'intensité des précipitations augmente. Pour l'ordre

de grandeur, des intensités de précipitations, utilisé pendant les simulations numériques, le modèle morphogénétique développé est peu sensible aux variations de cette intensité.

## 6.2 Recommandations

Afin d'améliorer le modèle développé, nous préconisons que les aspects énumérés ci-dessous fassent l'objet de recherches supplémentaires tel qu'identifiées ci-dessous :

### 6.2.1 Modélisation et simulations numériques

- 1) Développer un modèle, basé sur les forces qui agissent sur le film d'eau à la surface de l'ensemble de la structure, pour calculer les probabilités de déplacement des particules liquides dans chacune des directions.
- 2) Utiliser un domaine de simulation dont les coordonnées sont des nombres réels en vue d'accroître la fiabilité de la technique utilisée pour simuler la rotation du cylindre.
- 3) Employer un traitement particulier adéquat aux extrémités du cylindre recouvert de glace pour prendre en compte les longueurs réelles des conducteurs de phase et des câbles de garde.
- 4) Intégrer les conditions de service des conducteurs de phase et des câbles de garde des lignes de transport d'énergie comme le courant, la tension (effet Joule, effet Couronne), la flèche de la ligne, la torsion de la ligne.
- 5) Prendre en compte le phénomène d'éclaboussure pour tenir compte du volume d'eau effectif qui est capté par le cylindre recouvert de glace lors de l'impact des gouttelettes d'eau en surfusion.

- 6) Modéliser la rigidité en torsion des conducteurs afin de tenir compte des conditions réelles de leur givrage.
- 7) Déterminer la distribution du coefficient de transfert de chaleur à la surface du cylindre recouvert de glace pendant le processus d'accumulation dans le but de discriminer les échanges thermiques au niveau des glaçons.
- 8) Intégrer un coefficient d'adhérence des gouttelettes d'eau sur la surface du cylindre recouvert de glace pour prendre en compte le délestage dû aux forces aérodynamiques.
- 9) Prendre en compte de la hauteur à laquelle les conducteurs de phase et les câbles de garde des lignes de transport d'énergie sont installés. Cette hauteur est différente, d'un endroit à un autre pour un relief montagneux, engendrant ainsi une accumulation de glace non uniforme sur la portée de la ligne de transport d'énergie électrique. Les dissymétries de l'accumulation de glace qui ont court dans ces régions, induisent des charges longitudinales critiques de déséquilibre sur les supports.
- 10) Considérer la turbulence due à l'effet du vent dans la dynamique des gouttelettes d'eau en surfusion et dans le calcul des coefficients thermiques locaux.
- 11) Utiliser la programmation parallèle pour simuler simultanément le cheminement aléatoire de plusieurs gouttelettes, comme c'est le cas pendant les précipitations givrantes naturelles.

### 6.2.2 Expériences pratiques en laboratoire

- 1) Connaître le spectre granulométrique de la production des gicleurs.

- 2) Faire des expériences avec de faibles intensités de précipitations, 1 à 5 mm/h par exemple. Cela implique la modification du système de gicleurs de la chambre climatique de la CIGELE.
- 3) Étudier le givrage d'un cylindre soumis à un mouvement rotatoire de manière alternative dans le sens horaire et anti horaire sans toutefois être capable de faire un tour complet dans l'un des sens. Ceci simulerait bien la flexibilité en torsion des conducteurs de phase et des câbles de garde sous l'effet de la glace et du vent.

#### **6.2.3 Validation du modèle numérique et applications pratiques**

- 1) Utiliser des résultats expérimentaux provenant de stations extérieures de mesure pour la validation du modèle numérique morphogénétique.
- 2) Élaborer un modèle mathématique à partir des simulations du modèle numérique morphogénétique qui émane de la réalisation du point précédent.

Lorsque les recommandations citées ci-dessus seront intégrées aux modèles morphogénétiques, cela constituera sûrement l'amorce de l'élaboration d'un outil pratique capable de prédire fidèlement l'accrétion de glace sur les conducteurs de phase et les câbles de garde des lignes de transport d'énergie électrique au cours des tempêtes de verglas. Cet outil apportera ainsi, une contribution à l'élaboration de solutions innovatrices pour la réduction des effets mécaniques et électriques de la glace sur les conducteurs de phase et les câbles de garde des lignes de transport d'énergie électriques.

## BIBLIOGRAPHIE

- Abley, M., 1998, *the Ice Storm*,** Toronto: McLelland & Stewart, 192 pp.
- Achenbach, E., 1977, "The effect of surface roughness on the heat transfer from a circular cylinder to the cross flow of air," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 20,** pp. 359-369.
- Ackley, S.F., and Templeton, M.K., 1979, "Computer modeling of atmospheric ice accretion," *U.S. Army Corps of Engineers, CRREL Report 79-4*.**
- Admirat, P., and Sakamoto, Y., 1988, "Wet snow on overhead lines: state-of-art", *Proceedings 4<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, pp. 8-13.**
- Ahti, K., and Makkonen, L., 1982, "Observations on rime formation in relation to routinely measured meteorological parameters", *Geophysica*, vol. 19, pp. 75-85.**
- Avril, C., 1974, "Construction des Lignes Aériennes à Haute Tension ". *Editions Eyrolles, Paris, France*, pp.45-59.**
- Baranowski, S., and Liebensbach, J., 1977, "The intensity of different kinds of rime on the upper tree line in the Sudety Mountains". *Journal of Glaciology*, vol. 19, pp. 489-497.**
- Best, A. C., 1949, "The Size Distribution of Raindrops", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 76, pp. 16-36.**
- Blackmore, R. Z., 1996, "Vessel Icing and Spongy Accretion Modelling". PhD dissertation, University of Alberta, 231 pp.**

- Blackmore, R. Z., and Lozowski, E. P.,** 1998, "A theoretical spongy spray icing model with surficial structure", *Atmospheric Research, Volume 49, Issue 4, pp. 267-288.*
- CIGRE TB 172,** August 2000, "Guidelines for field measurement of ice loadings on overhead power line conductors", p. 11.
- Chainé, P.M., and Castonguay, G.,** 1974, "New Approach to Radial Ice Thickness Concept Applied to Bundle-like Conductors", Industrial Meteorology Study IV, Environment Canada, Toronto, p. 11.
- Chen, Y., Farzaneh, M., and Lozowski, E. P.,** 2000, "Modelling of Ice Accretion on a Transmission Line Conductor", *Proceedings 9<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Chester, England, 8 pp.
- Chen, Y.,** 2001, "A 2D Random Walk Model for Predicting Ice Accretion on a Cylindrical Conductor", MSc Thesis, University of Quebec at Chicoutimi, ISBN 0-612-65271-8, 82 pp.
- Commission Électrotechnique Internationale,** "Essais sous pollution artificielle des isolateurs pour haute tension destinés aux réseaux à courant alternatif", 2<sup>ième</sup> édition, CEI 60507, pp. 56, 1991.
- Commission Électrotechnique Internationale,** "Critères de conception des lignes aériennes de transport", 3<sup>ième</sup> édition, CEI 60826, pp. 61, 2003.
- De Bruyn, JR.,** 1977. "On the Formation of Periodic Arrays of Icicles", *Cold Regions Science and Technology*, vol. 25, pp.225-229.
- Diem, M.,** 1956, "Ice loads on high voltage lines in the mountains", *Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B*, vol. 7, pp. 84-85, (en Allemand).
- Egelhofer, K. Z., Ackley, S. F., and Lynch, D, R.,** 1984, "Computer modeling of atmospheric Ice accretion and aerodynamic loading of transmission lines", *Proceedings 2<sup>nd</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, p.103.

- Eter, W.**, 2003, "Système de suivi des tempêtes de verglas en temps réel", Master's dissertation in Engineering, Université du Québec à Chicoutimi, 187 pp.
- Eyglunent, B.**, 1997, "Manuel de thermique, théorie et pratique", 2e édition, Éditions HERMES, Paris, pp. 147-148.
- Eskandarian, M. and Farzaneh, M.**, 2005, "Texture and fabric characteristic of atmospheric ice deposits on overhead power lines", *Proceedings 11<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Montreal, Canada, pp.107-110.
- Félin, B.**, 1988, "Freezing rain in Quebec: field observations compared to model estimations", *Proceedings 4<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, pp. 119-123.
- Fikke, S., M.**, 2005a, "COST Action 727: Measuring and forecasting atmospheric icing on structures", *Proceedings 11<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Montreal, Canada, pp.115-120.
- Fikke, S., M.**, 2005b, "Modern Meteorology and Atmospheric Icing", *Proceedings 11<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Montreal, Canada, pp. 123-130.
- Fortin, G.**, Août 2002, "Thermodynamique de la glace atmosphérique", note de cours, 190 pp.
- Fu P., Farzaneh M. and Bouchard G.**, 2006, "Two-Dimensional Modelling of the Ice Accretion Process on Transmission Line Wires and Cables", *Cold Regions Science and Technology*, vol. 46, no. 3, pp.132-146.
- Fu P. and Farzaneh M.**, mars 2007, "Simulation of the ice accumulation process on a transmission line cable with differential twisting", *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 34, , pp. 147-155.

- Goodwin, E. J., Mozer, J. D., DiGioia, A.M., and Power, B. A.**, 1983, "Predicting ice and snow loads for transmission lines," *Proceedings 1st International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, pp. 267-273.
- Haldar, A., Pon, C., McComber, P., Marshall, M. A., Ishac, M., Goel, A., and Kastelein, M.**, 1996, "Validation of ice accretion models for freezing precipitation using field data," *Proceedings 7<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, pp. 189-194.
- Hémond, E.**, 1999, *Alerte au verglas ! La science monte au crâneau*, RÉSEAU / Magazine de l'Université du Québec, Vol. 30, numéro 4.
- Imai, I.**, 1953, "Studies on ice accretion", *Res. Snow Ice*, Vol. 1, pp. 35-44, (en japonais).
- Jones, K.F.**, 1996, "A Simple Model for Freezing Rain Ice Loads", *Proceedings 7<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Chicoutimi, Québec, pp.412-416.
- Krishnasamy, S. G., Tabatabai, M., and Kastelein, M.**, 1993, "A pilot field project to evaluate icing models in Ontario, Canada," *Proceedings. 6<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, pp. 85-97.
- Krishnasamy, S.G., and Brown, R.D.**, 1986, "Extreme value analysis of glaze ice accretion," *Proceedings 3<sup>rd</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, pp. 97-101.
- Langmuir, I., and Blodgett, K.**, 1960, "A mathematical investigation of water droplet trajectories," in *Collected Works of Irving Langmuir*, vol. 10, C.G. Suits Gen. Ed., Pergamon Press, pp. 348-393.
- Larouche, E.**, 2002, "Contribution à la prédiction par réseaux de neurones de l'accumulation de la glace atmosphérique sur les conducteurs de transport de l'énergie électrique", Master's dissertation in Engineering, Université du Québec à Chicoutimi, p. 126.

- Lébatto, E. B.**, 2004, "Modélisation en 3-D de l'accumulation de glace sur un cylindre fixe par la méthode du «cheminement aléatoire»", Master's dissertation in Engineering, Université du Québec à Chicoutimi, 105 pp.
- Lébatto, E.B., Farzaneh, M. and Lozowski, E.P.**, 2005, "Three-dimensional morphogenetic model of ice accretion on a non-rotating cylinder". *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Montreal, Canada, pp.101-106, 2005.
- Lébatto, E. B., Farzaneh, M. and Lozowski, E. P.**, 2004, "Modélisation en 2D et 3D de l'accumulation de la glace, due aux pluies verglaçantes, sur un conducteur de ligne par la méthode du «cheminement aléatoire »", *6<sup>ième</sup> Colloque annuel de la CIGELE*, Université du Québec à Chicoutimi.
- Lecomte, E.L., Pang, A.W. and Russel, J.W.**, 1998, "ICE STORM 98", Institute for Catastrophic Loss Reduction, Canada, 47 pp.
- Lenhard, R.W.**, 1955, "An indirect method for estimating the weight of glaze on wires", *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 36, pp. 1-5.
- Lozowski E.P., and Makkonen L.**, 2005, "Fifty Years of Progress in Modelling the Accumulation of Atmospheric Ice on Power Network Equipment", *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Montreal, Canada, pp. 55-62.
- Lozowski, E.P., Stallabrass, J.R., and Hearty, P.F.**, 1979, "The icing of an unheated, non-rotating cylinder in liquid water droplet-ice crystal clouds", *National Research Council of Canada*, Ottawa, CANADA, Mechanical Engineering Report LTR-LT-96, , 66 pp.
- Makkonen, L.**, 1985, "Heat transfer and icing of a rough cylinder," *Cold Regions Sci. Technol.*, vol. 10, pp. 105-116.
- Makkonen, L.**, 1988, "A model of icicle growth," *Journal of Glaciology*, vol. 34, pp. 64-70.

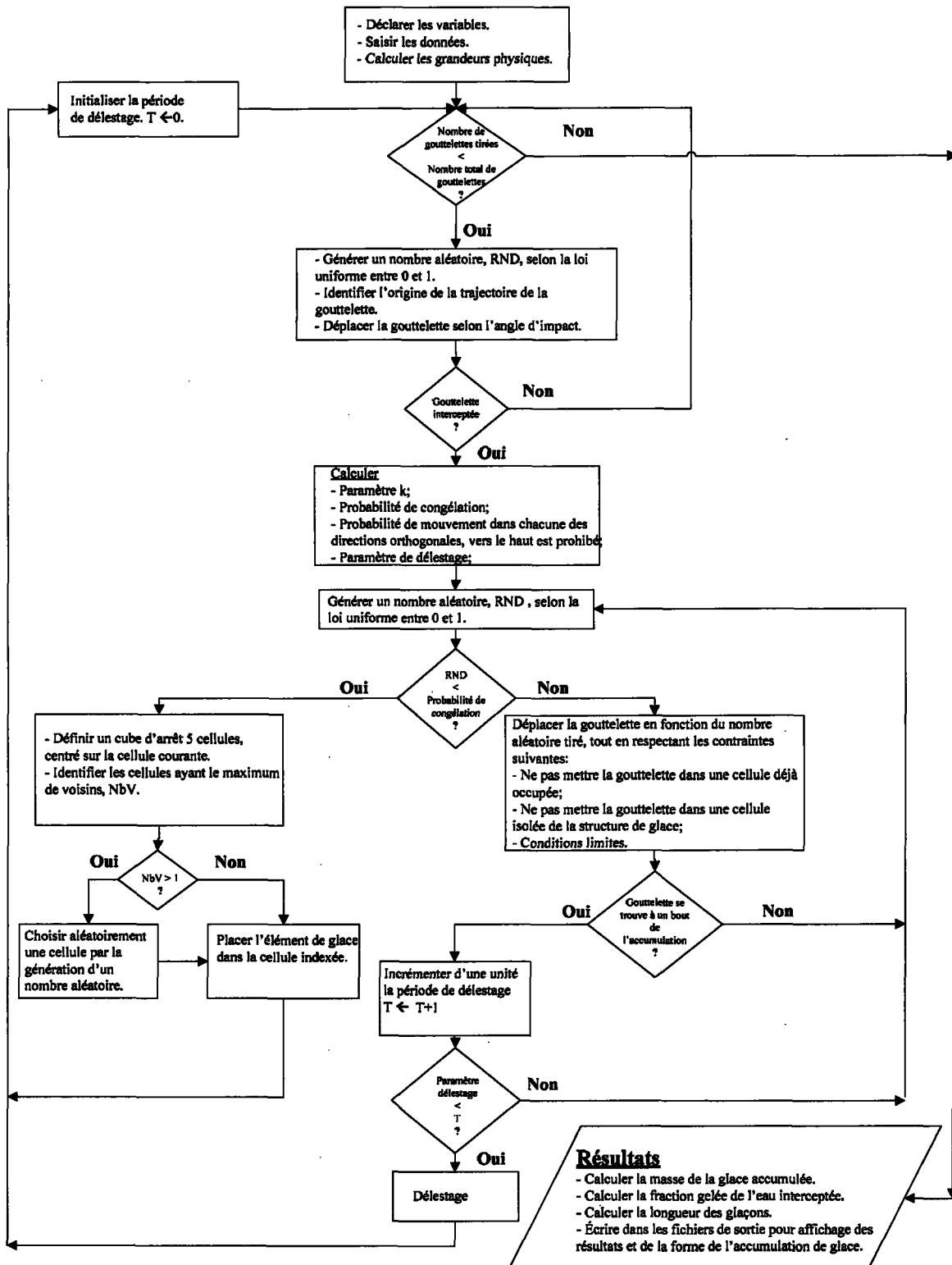
- Makkonen, L.**, 1989, "Estimation of wet snow accretion on structures", *Cold Regions Science and Technology*, vol. 17, pp. 83-88.
- Makkonen, L.**, 1996, "Modelling power line icing in freezing precipitation", *Proceedings Seventh International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, pp. 195-200, 1996.
- Makkonen, L.**, 1998, "Modelling power line icing in freezing precipitation", *Atmospheric Research*, vol. 46, pp. 131-142.
- Makkonen, L., and Fujii, Y.**, 1993, "Spacing of icicles", *Cold Regions Science and Technology*, 21(3), pp.317-322.
- Makkonen, L.**, 1981, "Estimating intensity of atmospheric ice accretion on stationary structures", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 20, pp. 595-600.
- Makkonen, L.**, 1984, "Modelling of Ice Accretion on Wires". *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 23, N°6, pp.929-939.
- Mason, B. J.**, 1971, "The Physics of Clouds". Second Edition, Clarendon Press, Oxford, 671pp.
- Matsumoto, M., and Nishimura, T.**, 1998, "Mersenne Twister: A 623-Dimensionally Equidistributed Uniform Pseudo-Random Number Generator", *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, vol. 8, no. 1, pp. 3-30.
- McComber, P.**, 1982, "Numerical simulation of ice accretion on cables," *Proceedings First International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, pp. 51-58.
- McComber, P.**, 1984, "Numerical simulation of cable twisting due to icing," *Cold Regions Science and Technology*, vol. 8, pp. 253-259.
- McComber, P.**, 2000, "A Non-circular Accretion Shape Freezing Rain Model for Transmission Line Icing", *Proceedings 9<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Chester, England, Session 7a.

- McComber, P., Druez, J., and Laflamme, J.**, 1993, "A comparison of selected models for estimating cable icing," *Atmospheric Research*, vol. 36, pp. 207-220.
- McKay, G.A., and Thompson, H.A.**, 1969, "Estimating the hazard of ice accretion in Canada from climatological data," *Journal of Applied Meteorology*, vol. 8, pp. 927-935.
- Peabody, A. B.**, 1993, "Snow loads on transmission and distribution lines in Alaska", *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, pp. 201-205.
- Personne, P. and Gayet J.-F.**, 1988, "Ice accretion on wires and anti-icing induced by Joule effect" *Journal of Applied Meteorology*, vol. 27, pp. 101-115.
- Poots, G.**, 1996, *Ice and Snow Accretion on Structures*. New York: Wiley, p. 338.
- Prabhu, R.**, 2001, MayaVi: A Free Tool for CFD Data Visualization. 4th Annual CFD Symposium, Aeronautical Society of India, 8 pp.
- Rink, J.**, 1938, "The melt water equivalent of rime deposits. *Reichsamt für Wetterdienst, Wissenschaftliche Abhandlungen*, vol. 5, p. 26, (en Allemand).
- Rivet, J-P., and Boon, J-P.**, 2001, "Lattice Gas Hydrodynamics", *Cambridge University Press*, 283 pp.
- Rudzinski, W. J., Lozowski, E. P., and Farzaneh, M.**, 2005, "Full-scale 3D Numerical and Laboratory Simulations of Glaze Ice Accretion on a Non-energized Station Post Insulator", *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Montreal, Canada, pp.183-190.
- Sakamoto, Y., and Miura, A.**, 1993, "An estimating method of snow load on overhead power lines", *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, pp. 133-138.
- Sakamoto, Y., Mizushima, K., and Kawanishi, S.**, 1990, "Dry type snow accretion on overhead wires – growing mechanism, meteorological condition under which it

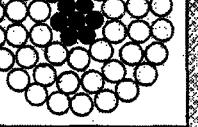
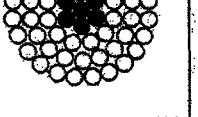
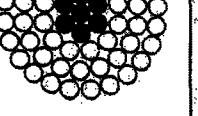
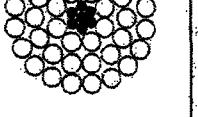
- occurs and effect on power lines", *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, paper B5-9.
- Snitkovskii, A.I.**, 1977, "Prediction of dangerous weather phenomena and prospects for research in this area", *Soviet Meteorology and Hydrology*, vol. 11, pp. 71-80.
- Stallabrass, J. R. and Hearty, P. F.**, 1967, "The Icing of Cylinders in Conditions of Simulated Freezing Sea Spray", *DME Report MD-50, National Research Council of Canada*, 15 pp.
- Sundin, E., and Makkonen, L.**, 1998, "Ice loads on a lattice tower estimated by weather station data", *Journal of Applied Meteorology*. vol. 37, pp. 523-529.
- Szilder, K.**, 1993, "The Density and Structure of Ice Accretion Predicted by a Random-walk Model", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 119, N° 513, pp. 907-924.
- Szilder, K.**, 1994, 1994, "Simulation of ice accretion on a cylinder due to freezing rain", *Journal of Glaciology*, Vol. 40, N°136, pp. 586-594.
- Szilder, K., and Lozowski, E.P.**, 1994, "Stochastic Modeling of Icicle Formation", *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, Vol 116, pp.180-184.
- Szilder, K., and Lozowski, E.P.**, 1995a, "A New Method of Modelling Ice Accretion on Objects of Complex Geometry". *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol.5, N°1, pp.37-42.
- Szilder, K., and Lozowski, E.P.**, 1995b, "Simulation of Icicle Growth Using a Three-Dimensional Random Walk Model". *Atmospheric Research*, Vol. 36, pp. 243-249.
- Szilder, K., and Lozowski, E.P.**, 6-9 January 2003, "Discrete modelling of ice accretion shape and structure forming on a cylinder under in-flight icing conditions", *41<sup>st</sup> Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, 11 pp.

- Taylor, G.I.**, 1950, "The Instability of Liquid Surfaces when Accelerated in a Direction Perpendicular to their Planes I", *Proceedings Royal Society London, Ser A*, Vol. 201, pp.192-196.
- Waibel, K.**, 1956, "Meteorological conditions of rime deposition on high voltage lines in the mountains". *Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser. B*, vol. 7, pp. 74-83, (en Allemand).
- Yip, T.C. and Mitten, P.**, 1991, "Comparisons between different ice accretion models", Canadian electrical Association, Transmission Line Design Subsection, Transmission Section, Engineering and Operating Division, Toronto, 13 pp.
- Yip, T.C.**, 1993, "Estimating icing amounts caused by freezing precipitation in Canada", *Atmospheric Research*, vol. 36, pp. 221-232.

## ANNEXE A : Organigramme du programme numérique



## ANNEXE B : Principaux conducteurs utilisés par Hydro-Québec

Nom	Type et nombre de brins (Alu/Acier)	Diamètre (mm)	Masse linéique (kg/m)	Surface nominale (mm <sup>2</sup> )	Résistance limite (kN)	Schématisation de la section (en vraie grandeur sur feuille de format 8,5" X 11")
BERSFORT	ACSR 48/7	36,8	2,369	686,5	180,1	
BERSIMIS	ACSR 42/7	35,1	2,185	689,7	154,3	
CONDOR	ACSR 54/7	27,8	1,522	402,8	127,0	
CURLEW	ACSR 54/7	31,6	1,979	523,7	165,2	
LES-BOULES	ACSR 42/7	27,9	1,387	438,3	100,3	

**ANNEXE C : Givrage d'un cylindre en rotation ou fixe (trajectoire verticale ou oblique des gouttelettes est verticale.**

```

#pragma hdrstop

#include <cstdio>
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <cstdlib>
#include <ctime>
#include <iomanip>
#include <cmath>
#include "randomc.h" //défini la classe pour le générateur de nombre
//aléatoire uniforme
using namespace std;

//déclaration des constantes

const double Diametre = 35.0; //diamètre du cylindre, mm
const long XTaille = 500; //largeur du domaine axe X (mm)
const long YTaille = 1000; //hauteur du domaine axe Y (mm)
const long ZTaille = 200; //longueur du domaine axe Z (mm)
const long n = 2; //paramètre de congélation
const double MVD = 1.0; // diamètre volume médian
const double Kref = 0.02415; //conductivité thermique air à 0°C, W/m/K
const double Muref = 1.4964E-5; //viscosité dynamique air, Pa.s
const double S1 = 194.44; //constante de Sutherland, K
const double S2 = 120.0; //constante de calcul pour visc. Dyn. air, K
const double Tref = 273.16; //temp. surface du cylindre givré, K
const double RhoAir = 1.293; //densité air kg/m3
const double RhoEau = 1000; //masse volumique de l'eau, kg/m3
const double Ca = 1004.5; // chaleur spécifique de l'air, J/kg/K
const double Ce = 4217.7; // chaleur spécifique de l'eau, J/kg/K
const double Dref = 2.282E-5; // coef. de diff. vapeur dans air, à 20°C et
//101,3 kPa, m2/s
const double Pref = 101300; // pression de référence, Pa
const double Ra = 287.0; // constante gaz parfait pour l'air, J/kg/K
const double Rv = 461.5; //constante de gaz parfait pour la vapeur
//d'eau, J/kg/K
const double PvsatRef = 610.8; //pression de vapeur d'eau saturée à Tref
const double Lv = 2501300; //chaleur latente de vaporisation, J/kg
const double Epsilon = 0.622; //masse mol. vapeur d'eau par masse d'air
const double Lf = 334400; // chaleur latente de fusion de l'eau J/kg
const double PI = 3.1415926; // nombre PI
const double Mcr = 0.0032; //masse critique de l'eau pendante kg/m
const double DeltaT = 0.1; // pas de temps (s)
const double DeltaL = 0.001; // arête d'une cellule
int32 seed = 1000; //valeur de départ heure courante
TRandomMersenne rg(seed); //instance du générateur de nombres aléatoires

```

```

long maximum (long , long); //retourne le max de deux nombres
long minimum (long , long); // retourne le min de deux nombres

// Détermine le nombre de voisins de la cellule courante
long NombreDeVoisin(char ***,long ,long ,long ,const long ,const long
,const long );

// Détermine la cellule qui accueille la particule de glace
void Congelation(char ***,long ,long ,const long ,const long ,const
long ,long ,double , long &,long &,long &,long &, double);

int main()
{
    srand(seed);

    //déclaration des fichiers de sortie
    fstream stream1 ("Glacell.vtk", ios::out),
    stream7 ("Cylindre.vtk", ios::out),
    stream8 ("Résultats.txt", ios::out),
    stream9 ("Glacel.vtk", ios::out),
    stream10 ("LongeurGlacons10.txt", ios::out),
    stream11 ("AngleGlacons10.txt", ios::out);

    //déclaration des variables

    bool Stop;

    long Control3,Control2, //Variable de contrôle des boucles
    ControlNbGte,
    Glacel,
    NbVoisin, //nombre de voisins de la cellule courante
    NombrePointsCyl,
    PDControl, //variable de contrôle du délestage
    RayonInt, //Rayon du cylindre sans la partie flottante
    X,Y,Z,Xtp,Ytp,Ztp, //Coordonnées de points dans le domaine
    XCentre, //abscisse de l'axe central du cylindre
    YCentre, //ordonnée de l'axe central du cylindre
    XCalcule, //abscisse utilisé pour la rotation du cylindre
    YCalcule, //ordonnée utilisé pour la rotation du cylindre
    Y1,Y2, //ordonnées utilisées pour tracer les faces circulaires du cylindre
    PlusPetitX,
    PlusGrdX,
    PlusGrdY,
    PlusPetitY,
    NbreDec,
    PartDelest; // nombre de particule perdues
}

```

```

double aY,bX, //ax+b=y trajectoire des gouttelettes
NombreTotalGouttes, //nombre total de gouttelettes
NombreGouttesIntercep, //nombre gouttelettes interceptées
Ctrl_NombreGouttesGelees, //Variable de contrôle
Ctrl_NombreGouttesGelees1, //Variable de contrôle
NombreTotalGouttesDec, //nombre de gouttelettes par décalage
VitesseRotCyl, // vitesse de rotation du cylindre tour/min
AngleImpact, //angle d'impact des gouttelettes
ChoixAnglRot, // angle de décalage du mouvement circulaire
NbreDecalageCylGiv, // nombre de décalage du cylindre givré
AngleInclinaisonCabl, //angle d'inclinaison du cylindre
PM, // paramètre de déplacement
VitesseVent, //vitesse du vent
VitesseTermGoutte, // vitesse terminale des gouttelettes
B, //Y*Y+C*Y+B(X)=0 (1), sert à tracer le cylindre
Discriminant, //discriminant de Y*Y+C*Y+B(X)=0
DurPrecip, //durée du givrage
ProbC, //probabilité de congélation d'une gouttelette
PD, //paramètre de délestage
Precip, //intensité des précipitations en mm/h
PxD, //probabilité de mouvement à vers la droite
PxG, // probabilité de mouvement à vers la gauche
PyB, // probabilité de mouvement à vers le bas
PzAr, // probabilité de mouvement à vers l'arrière
PzAv, // probabilité de mouvement à vers l'avant
rl, //nombre aléatoire
Ka, //conductivité thermique de l'air à Ta, W/m/K
Ta, // température de l'air en °C
Mua, //viscosité dynamique de l'air à Ta, Pa.s
NRe, //nombre de Reynolds
ARE, //constante pour calculer le nombre de Nusselt,
MRe, //constante pour calculer le nombre de Reynolds;
NNu, //nombre de Nusselt
Hc, //coeff. de transfert thermique convectif, (W/m*m/K)
HeatConv, //flux de chaleur par convection, (W/m*m)
HeatEv, // flux de chaleur par évaporation, (W/m*m)
HeatGte, //flux therm. due à l'élévation de la température des gouttelettes
HeatTot, //flux totale de chaleur
NPr, //nombre de Prandtl
PressAirA, // pression de l'air à température, Pa
Dva, //coefficient de diffusion thermique de l'air m/s2
Sc, //nombre de Schmidt
PvsatA, //pression de vapeur saturée à Ta
Rayon, //rayon du cylindre
RayonCalcule, //distance entre une cellule et axe du cylindre
AngleCalcule,
Co1,Co2,Co3, // Constante de calcul
Para, //constante de calcul
CelK, // longueur maximale
MassIce, //masse de glace accumulée
SommeAngle, // Constante de calcul
SommeLongueur, // Constante de calcul
VolumeCyl, //volume du cylindre nu

```

```

VolumeCylGiv,      //volume du cylindre givré
RayonCylGiv, // rayon équivalent du cylindre givré
EpRadEq, // épaisseur uniforme radiale équivalente

struct point{
    int ord;
    int absc;
};

char ***Domaine ; //domaine de simulation
char ***DomaineRot ; //domaine tampon de simulation
double *AngleGlacon ; //Angle des glaçons
double *LongGlacon ; //longueur des glaçons
point *BoutGlacon ; //bout des glaçons

Domaine = new char **[YTaille];
for (int i=0; i< YTaille;i++)
Domaine[i]= new char *[XTaille];
for (int i =0;i< YTaille;i++)
for (int j=0; j<XTaille; j++)
Domaine[i] [j]=new char[ZTaille];

DomaineRot = new char **[YTaille];
for (int i=0; i< YTaille;i++)
DomaineRot[i]= new char *[XTaille];
for (int i =0;i< YTaille;i++)
for (int j=0; j<XTaille; j++)
DomaineRot[i] [j]=new char[ZTaille];

AngleGlacon = new double [ZTaille];
LongGlacon = new double [ZTaille];
BoutGlacon = new point [ZTaille];

// Initialisation du domaine

NombrePointsCyl = 0;
for(int YCompteur=0; YCompteur < YTaille; YCompteur++)
for (int XCompteur=0; XCompteur < XTaille; XCompteur++)
for (int ZCompteur=0; ZCompteur < ZTaille; ZCompteur++)
Domaine [YCompteur] [XCompteur] [ZCompteur]='V';

for(int YCompteur=0; YCompteur < YTaille; YCompteur++)
for (int XCompteur=0; XCompteur < XTaille; XCompteur++)
for (int ZCompteur=0; ZCompteur < ZTaille; ZCompteur++)
DomaineRot [YCompteur] [XCompteur] [ZCompteur]='V';

```

```

//initialisation des variables

ControlNbGte = 0;
Ctrl_NombreGouttesGelees = 0.0;
Ctrl_NombreGouttesGelees1 = 0.0;
NombreGouttesIntercep = 0.0;
PartDelest=0;
Glace1 = 0;
NbVoisin = 0;
PlusPetitX = XTaille;
PlusGrdX = 0;
PlusGrdY = 0;
PlusPetitY = YTaille;
VolumeCyl = 0.0;
VolumeCylGiv = 0.0;
RayonCylGiv = 0.0;
EpRadEq = 0.0;

//saisie des entrées

Ta = -3.7 + 273.16;
VitesseVent = 5.28;

// Calcul vitesse terminale des gouttelettes

VitesseTermGoutte = 9.32*(1-exp(-pow(MVD,1.85)));
AngleInclinaisonCabl = 0.0;

AngleImpact=atan2(VitesseVent,(cos(AngleInclinaisonCabl*PI/180.0)
*VitesseTermGoutte));

Precip = 1.01/cos(AngleImpact);
DurPrecip = 1.0;

YCentre = 300;
XCentre = 250;
ChoixAnglRot = 10.0;
VitesseRotCyl = 6.0;

//calcul du nombre de décalage pour la durée du givrage

NbreDecalageCylGiv=ceil(VitesseRotCyl*360*DurPrecip*60/ChoixAnglRot);

ChoixAnglRot = ChoixAnglRot*PI/180.0;

//calcul du nombre total de particule de glace pour le givrage

NombreTotalGouttes=ceil(XTaille*ZTaille*DurPrecip*Precip*cos(AngleImpact)
/0.9);

```

```

//calcul du nombre de gouttelettes par décalage angulaire

NombreTotalGouttesDec=ceil(((DurPrecip*(Precip*cos(AngleImpact))/0.9)*XTaille*ZTaille)/(NbreDecalageCylGiv));

/*****************CALCULS PRÉALABLES******************/

// Calcul de la conductivité thermique de l'air à la température ambiante, Ta
Ka = Kref * pow((Ta/Tref),(3.0/2.0)) * (Tref+S1)/(Ta+S1);

// Calcul de la viscosité dynamique de l'air thermique à la température ambiante, Ta
Mua = Muref * pow(Ta,1.5)/(Ta+S2);

//Calcul du nombre de Reynolds
NRe = (Diametre * 0.001) * RhoAir * VitesseVent/Mua;

// choix des constantes pour calculer le nombre de Nusselt par rapport au nombre de Reynolds
if(NRe > 40000){
  ARe = 0.024;
  MRe = 0.805;
} else if(NRe > 4000){
  ARe = 0.174;
  MRe = 0.618;
} else if (NRe > 40){
  ARe = 0.615;
  MRe = 0.466;
} else if (NRe > 4){
  ARe = 0.821;
  MRe = 0.385;
} else{
  ARe = 0.891;
  MRe = 0.330;
}

//calcul du nombre de Nusselt
NNu = ARe*pow(NRe,MRe);

//calcul du coefficient de transfert thermique par convection
Hc =Ka*NNu/(Diametre*0.001);

//Perte de chaleur par convection
HeatConv = Hc*(Tref - Ta);

//calcul du nombre de Prandtl
NPr = Mua*Ca/Ka;

//calcul de la pression de l'air à Ta
PressAirA = RhoAir*Ra*Ta;

```

```

//calcul du coefficient de diffusion thermique de l'air à Ta
Dva = Dref*(Pref/PressAirA)*pow((Ta/Tref),(3.0/2.0));

//calcul du nombre de schmidt
Sc = Mua/(RhoAir*Dva);

// calcul de la pression de vapeur saturée à Ta
PvsatA = PvsatRef*exp(Lv*(Ta-273.16)/(Rv*Tref*Ta));

// Perte de chaleur par diffusion thermique
HeatEv=Hc*pow((NPr/Sc),0.63)*Epsilon*Lv*(PvsatRef-PvsatA)/(PressAirA*Ca);

//perte de chaleur due à l'élévation de la température de la gouttelette
HeatGte=(NombreGouttesIntercep/NombreTotalGouttes)*RhoEau*((Precip*cos(AngleImpact))/3600000)*Ce*(Tref-Ta);

// Perte totale de chaleur
HeatTot = HeatConv + HeatEv + HeatGte;

//calcul du rayon du cylindre en valeur entiere
Rayon = Diametre/2.0;
RayonInt= int(Rayon);

for (int Compteur1 = 0; Compteur1 < ZTaille; Compteur1++) {
BoutGlacon[Compteur1].absc = XCentre;
BoutGlacon[Compteur1].ord = YCentre + RayonInt;
LongGlacon[Compteur1] = Rayon;
AngleGlacon[Compteur1] = 0.0; }

//Tracé du cylindre dans le domaine
for (int Compteur1=(XCentre-RayonInt);Compteur1 <= (XCentre + RayonInt);
Compteur1++) {
B=-pow(Rayon,2.0)+pow(double(Compteur1-XCentre),2.0)+
pow(double(YCentre),2);
Discriminant = pow((2.0*double(YCentre)),2)-4.0*B;
Y1 = int(fabs((-2*YCentre - sqrt(Discriminant))/2.0));
Y2 = int(fabs((-2*YCentre+sqrt(Discriminant))/2.0));

for (int Compteur2 = Y2; Compteur2 <= Y1; Compteur2++)
for (int Compteur3=0; Compteur3 < ZTaille; Compteur3++){
Domaine [Compteur2] [Compteur1] [Compteur3]='C';
DomaineRot [Compteur2] [Compteur1] [Compteur3]='C';
NombrePointsCyl++;

if (Compteur2 < PlusPetitY)
PlusPetitY = Compteur2;

if (Compteur1 < PlusPetitX)
PlusPetitX = Compteur1;

if (Compteur2 > PlusGrdY)
PlusGrdY = Compteur2;
}
}

```

```

if (Compteur1 > PlusGrdX)
PlusGrdX = Compteur1; }

stream7 << "# vtk DataFile Version 1.0" << endl;
stream7 << "Cable stuff" << endl;
stream7 << "ASCII" << endl;
stream7 << "DATASET POLYDATA" << endl;
stream7 << "POINTS " << NombrePointsCyl << " FLOAT" << endl;

for (int Y_compteur = 0; Y_compteur < YTaille; Y_compteur++)
for (int X_compteur = 0; X_compteur < XTaille; X_compteur++)
for (int Z_compteur = 0; Z_compteur < ZTaille; Z_compteur++)
if (Domaine[Y_compteur][X_compteur][Z_compteur] == 'C'){
VolumeCyl++;
stream7 << X_compteur << " " << YTaille - Y_compteur << " " << Z_compteur << endl; }
stream7 << "VERTICES 1 " << NombrePointsCyl + 1 << endl;
stream7 << NombrePointsCyl << endl;

for (int i = 0; i < NombrePointsCyl; i++) {
stream7 << i << endl; }

/* AFFICHAGE DES RÉSULTATS DANS UN FICHIER */

stream8 << "      RÉSULTATS      " << endl;
stream8 << "*****" << endl;
stream8 << "      " << endl;
stream8 << "      " << endl;
stream8 << "      " << endl;
stream8 << "Température air: " << Ta - 273.16 << " °C " << endl;
stream8 << "Intensité précipitations: " << (Precip * cos(AngleImpact)) ;
stream8 << " mm/h " << endl;
stream8 << " Durée des précipitations : " << DurPrecip ;
stream8 << " h " << endl;
stream8 << " Vitesse du vent : " << VitesseVent ;
stream8 << " m/s " << endl;
stream8 << " Vitesse de rotation du cylindre : " << VitesseRotCyl ;
stream8 << " tr/min " << endl;
stream8 << " Nombre total de particules : " << NombreTotalGouttes ;
stream8 << endl;
stream8 << "Angle d'inclinaison du câble : " << AngleInclinaisonCabl ;
stream8 << "°" << endl;
stream8 << "Diamètre du cylindre: " << Diametre << " mm " << endl;
stream8 << "Vitesse terminale des gouttelettes: " << VitesseTermGoutte ;
stream8 << " m/s " << endl;
stream8 << "Angle d'impact des gouttelettes: " << AngleImpact * 180 / PI;
stream8 << "°" << endl;
stream8 << " Conductivité thermique de l'air à " << Ta - 273.16 ;
stream8 << "°C: " << Ka << " W/m/K " << endl;
stream8 << " Viscosité dynamique de l'air à " << Ta - 273.16 ;
stream8 << "°C: " << Mua << " Pa.s " << endl;
stream8 << " Nombre de Reynolds: " << NRe << endl;
stream8 << " Nombre de Nusselt: " << NNu << " ( " << ARe << " , " << MRe ;

```

```

stream8 << " ) << endl;
stream8 << "Coef de transfert therm conv:<< Hc << W/m2/K " << endl;
stream8 << "flux thermique convectif:<<HeatConv<<W/(m2)" << endl;
stream8 << "flux thermique par diffusion:<<HeatEv <<W/(m2)" << endl;
stream8 << "flux thermique glace/gouttelettes incidentes:<<HeatGte;
stream8 << " W/(m2) " << endl;
stream8 << "Perte de chaleur Totale: << HeatTot <<W/(m2) " << endl;
stream8 << " Nombre de Prandtl: << NPr << endl;
stream8 << "Pression de l'air à << Ta-273.16 <<:" << PressAirA ;
stream8 << "Pa " << endl;
stream8 << " coeff. diffusion thermique de l'air à <<Ta-273.16 ;
stream8 << "°C : << Dva << m2/s " << endl;
stream8 << " Nombre de Schmidt: << Sc << endl;
stream8 << " Pression de vapeur saturée à << Ta-273.16 ;
stream8 << "°C: << PvsatA << Pa " << endl;
stream8 << " Pression de vapeur saturée à << Tref-273.16 ;
stream8 << "°C: << PvsatRef << Pa " << endl;

//Accumulation de glace

NbreDec = 0;
while((ControlNbGte<NombreTotalGouttes)&&(NbreDec<NbreDecalageCylGiv)){
for(int minInd=0;minInd<NombreTotalGouttesDec;minInd++){
// Tirage d'une nouvelle gouttelette
Stop = false;
PDCControl = 0;
// calcul de la trajectoire de la gouttelette avant son impact

if (AngleImpact == 0.0){
X = int(rg.Random()*(XTaille-1-n));
Z = int(rg.Random()*(ZTaille-1-n));
Y = 0;
Control2 = 0;
while (Control2 == 0){
NbVoisin=NombreDeVoisin(Domaine,Y,X,Z,YTaille,XTaille,ZTaille);
if (NbVoisin >= 1){
Domaine[Y][X][Z] ='E';
NombreGouttesIntercep++;
Control2 = 1;
Stop = true;}
else{
Y++;
if (Y >= (YTaille-n)){
Control2 = 1;}}}
else{
X = int(rg.Random()*(XTaille-1-n));
Z = int(rg.Random()*(ZTaille-1-n));
Y = 0;
bX = X;
aY = Y;
Control2 = 0;
while (Control2 == 0){

```



```

// Perte totale de chaleur
HeatTot = HeatConv + HeatEv + HeatGte; }
else{
PDControl++;}
else if (r1 <= (ProbC+PxD)) /* Déplacement à droite*/{
X++;
if (X >= (XTaille-n)){
X--;
PDControl++;}
else{
NbVoisin = NombreDeVoisin(Domaine,Y,X,Z,YTaille,XTaille,ZTaille);
if ((Domaine[Y][X][Z]=='I') || (Domaine[Y][X][Z]=='C') || (NbVoisin==0)) {
X--;
if ((Domaine[Y+1][X][Z]!='I') && (Domaine[Y+1][X][Z]!='C')) {
PDControl++;}
Else{
Domaine[Y][X-1][Z]='V';
Domaine[Y][X][Z]= 'D';
if ((Domaine[Y+1][X][Z]!='I') && (Domaine[Y+1][X][Z]!='C')) {
PDControl++;}}}

else if (r1 <= (ProbC+PxD+PxG)) /*Déplacement à gauche*/{
X--;
if (X < n){
X++;
PDControl++;}
Else{
NbVoisin = NombreDeVoisin(Domaine,Y,X,Z,YTaille,XTaille,ZTaille);
if((X<n) || (Domaine[Y][X][Z]=='I') || (Domaine[Y][X][Z]=='C') || (NbVoisin==0))
{
X++;
if ((Domaine[Y+1][X][Z]!='I') && (Domaine[Y+1][X][Z]!='C')) {
PDControl++;}
else{
Domaine[Y][X+1][Z]='V';
Domaine[Y][X][Z]= 'E';
if ((Domaine[Y+1][X][Z]!='I') && (Domaine[Y+1][X][Z]!='C')) {
PDControl++;}}}

else if (r1 <= (ProbC+PxD+PxG+PzAv)) /*Déplacement en avant*/{
Z++;
if (Z>= (ZTaille-n)){
Ztp = n;
Ytp = Y;
Xtp = X;
NbVoisin = NombreDeVoisin(Domaine,Ytp,Xtp,Ztp,YTaille,XTaille,ZTaille);
if ((Domaine[Ytp][Xtp][Ztp]!='I') && (Domaine[Ytp][Xtp][Ztp]!='C') && (NbVoisin!=0)){
Domaine[Y][X][Z-1]='V';
Z = Ztp;
Domaine[Y][X][Z]= 'D';
PDControl++;}
else{
Domaine[Y][X][Z-1]='V';
Domaine[Y][X][Z]= 'D';
PDControl++;}}}

```

```

if ((Domaine[Y+1][X][Z] != 'I') && (Domaine[Y+1][X][Z] != 'C')) {
    PDControl++;
}
else{
    Z--;
    if ((Domaine[Y+1][X][Z] != 'I') && (Domaine[Y+1][X][Z] != 'C')) {
        PDControl++;
    }
    else{
        NbVoisin = NombreDeVoisin(Domaine, Y, X, Z, YTaille, XTaille, ZTaille);
        if ((Domaine[Y][X][Z] == 'I') || (Domaine[Y][X][Z] == 'C') || (NbVoisin == 0)){
            Z--;
            if ((Domaine[Y+1][X][Z] != 'I') && (Domaine[Y+1][X][Z] != 'C')) {
                PDControl++;
            }
            else{
                Domaine[Y][X][Z-1] = 'V';
                Domaine[Y][X][Z] = 'D';
                if ((Domaine[Y+1][X][Z] != 'I') && (Domaine[Y+1][X][Z] != 'C')) {
                    PDControl++;
                }
            }
            else if (r1 <= (ProbC+PxD+PxG+PzAv+PzAr)) /*Déplacement en arrière*/{
                Z--;
                if (Z < n){
                    Ztp = ZTaille-1-n;
                    Ytp = Y;
                    Xtp = X;
                    NbVoisin = NombreDeVoisin(Domaine, Ytp, Xtp, Ztp, YTaille, XTaille, ZTaille);
                    if ((Domaine[Ytp][Xtp][Ztp] != 'I') && (Domaine[Ytp][Xtp][Ztp] != 'C') && (NbVoisin != 0)){
                        Domaine[Y][X][Z+1] = 'V';
                        Z = Ztp;
                        Domaine[Y][X][Z] = 'D';
                        if ((Domaine[Y+1][X][Z] != 'I') && (Domaine[Y+1][X][Z] != 'C')) {
                            PDControl++;
                        }
                        else{
                            Z++;
                            if ((Domaine[Y+1][X][Z] != 'I') && (Domaine[Y+1][X][Z] != 'C')) {
                                PDControl++;
                            }
                            else{
                                NbVoisin = NombreDeVoisin(Domaine, Y, X, Z, YTaille, XTaille, ZTaille);
                                if ((Domaine[Y][X][Z] == 'I') || (Domaine[Y][X][Z] == 'C') || (NbVoisin == 0)){
                                    Z++;
                                    if ((Domaine[Y+1][X][Z] != 'I') && (Domaine[Y+1][X][Z] != 'C')) {
                                        PDControl++;
                                    }
                                    else{
                                        Domaine[Y][X][Z+1] = 'V';
                                        Domaine[Y][X][Z] = 'D';
                                        if ((Domaine[Y+1][X][Z] != 'I') && (Domaine[Y+1][X][Z] != 'C')) {
                                            PDControl++;
                                        }
                                    }
                                }
                            }
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}
else /*if (r1 <= (ProbC+PxD+PxG+PzAv+PzAr+PyB)), Déplacement en bas*/{
    Y++;
    if (Y >= (YTaille-n)){
        Y--;
        PDControl++;
    }
}

```





```

if (BoutGlacon[Z_compteur].ord < Y_compteur){
BoutGlacon[Z_compteur].ord = Y_compteur;
BoutGlacon[Z_compteur].absc = X_compteur;}}}

stream1 << "VERTICES 1 "<<Glace1+1<<endl;
stream1 << Glace1 <<endl;

stream9 << "VERTICES 1 "<<Ctrl_NombreGouttesGelees+1<<endl;
stream9 << Ctrl_NombreGouttesGelees <<endl;
for (long i=0; i < Glace1 ; i++){
stream1 <<i<<endl;}

for (long i=0; i < Ctrl_NombreGouttesGelees ; i++){
stream9 << i << endl;}
SommeLongueur = 0.0;
SommeAngle = 0.0;

for (int Compteur1 = 0; Compteur1 < ZTaille; Compteur1++){
LongGlacon[Compteur1] = sqrt(pow(double(XCentre -
BoutGlacon[Compteur1].absc),2) + pow(double(BoutGlacon[Compteur1].ord-
YCentre),2));
AngleGlacon[Compteur1] = (180.0/PI)*atan(double((XCentre -
BoutGlacon[Compteur1].absc)/(BoutGlacon[Compteur1].ord-YCentre)));
SommeLongueur = SommeLongueur + (LongGlacon[Compteur1]-RayonInt) ;
SommeAngle = SommeAngle + AngleGlacon[Compteur1];
stream10 << LongGlacon[Compteur1] <<endl;
stream11 << AngleGlacon[Compteur1] <<endl;}

stream8 << " Probabilité de congélation de la dernière gouttelette: "<<
ProbC <<endl;
stream8 << " Paramètre de délestage de la dernière gouttelette: "<< PD
<<endl;
stream8 << " Nombre de gouttes interceptées :" << NombreGouttesIntercep
<< endl;
stream8 << " Nombre de gouttesGelees :" << Ctrl_NombreGouttesGelees <<
endl;
stream8 << " Nombre de gouttes Gelees1 :" << Ctrl_NombreGouttesGelees1 <<
endl;
stream8 << " Nombre de gouttelettes perdues :" << PartDelest << endl;
stream8 << " Fraction de gouttelettes gelées: "<<
100*Ctrl_NombreGouttesGelees/NombreGouttesIntercep <<endl;
stream8 << " Masse de glace :" << MassIce<< endl;
stream8 << " Masse de glace2 :" << 5.0*MassIce<< endl;
stream8 << "Longueur glaçons :" <<SommeLongueur/ZTaille << endl;
stream8 << "Angle glaçons :" <<SommeAngle/ZTaille << endl;
stream8 << "PlusPetitX :" <<PlusPetitX << endl;
stream8 << "PlusGrdX:" << PlusGrdX << endl;
stream8 << "PlusPetitY :" << PlusPetitY << endl;
stream8 << "PlusGrdY" << PlusGrdY << endl;
stream8 << "ProbC:" << ProbC << endl;
stream8 << "PxD:" << PxD << endl;
stream8 << "PxG:" << PxG << endl;
stream8 << "PzAr:" << PzAr << endl;

```

```

stream8 << "PzAv:" << PzAv << endl;
stream8 << "PyB:" << PyB << endl;
stream8 << " CelK:" << CelK << endl;
stream8 << " Perte de chaleur par convection:" << HeatConv << " W/(m2)"
<< endl;
stream8 << " Perte de chaleur par diffusion thermique: " << HeatEv <<
W/(m2) " << endl;
stream8 << " Perte de chaleur couche de glace et gouttelettes incidentes:
" << HeatGte << " W/(m2) " << endl;
stream8 << " Perte de chaleur Totale: " << HeatTot << " W/(m2) " << endl;
stream8 << " Para:" << Para << endl;
stream8 << " Épaisseur radiale équivalente:" << EpRadEq << " mm " << endl;
stream8 << " nombre de décalage:" << NbreDec << endl;
stream8 << " nombre de gouttelette par décalage:" << NombreTotalGouttesDec
<< endl;
stream8 << " nombre de décalage requis pour la durée de la simulation:" <<
NbreDecalageCylGiv << endl;

stream1.close();
stream2.close();
stream3.close();
stream4.close();
stream5.close();
stream6.close();

return 0;
}

/*****************************************/
/* Fonction "maximum" recherche le plus grand de deux entiers */
/*****************************************/
long maximum (long XF2, long XF3 )
{
long plusgrand;
if (XF2 >= XF3)
plusgrand = XF2;
else
plusgrand = XF3;
return plusgrand;
}

/*****************************************/
/* Fonction "minimum" recherche le plus petit de deux entiers*/
/*****************************************/
long minimum (long XF2, long XF3 ) {
long pluspetit;
if (XF2 <= XF3)
pluspetit = XF2;
else
pluspetit = XF3;
return pluspetit; }

```

```

/*****************/
/* Fonction "NombreDeVoisin" cherche le nombre de cellules */
/*   voisines occupées de la cellule courante */
/*****************/
long NombreDeVoisin(char ***DomainePtr,long YF1,long XF1,long ZF1,const
long TailleY,const long TailleX,const long TailleZ){
long maximum (long , long);
long minimum (long , long);

long GrandY,GrandX,GrandZ,PetitY,PetitX,PetitZ,NbV;

PetitY = maximum(2,YF1-1);
PetitX = maximum(2,XF1-1);
PetitZ = maximum(2,ZF1-1);
GrandY = minimum(TailleY-1-2,YF1+1);
GrandX = minimum(TailleX-1-2,XF1+1);
GrandZ = minimum(TailleZ-1-2,ZF1+1);
NbV = 0;
for (int CompteurY = PetitY; CompteurY <= GrandY; CompteurY++)
for (int CompteurX = PetitX; CompteurX <= GrandX; CompteurX++)
for (int CompteurZ = PetitZ; CompteurZ <= GrandZ; CompteurZ++)
if((DomainePtr [CompteurY] [CompteurX] [CompteurZ]=='C') || (DomainePtr
[CompteurY] [CompteurX] [CompteurZ]== 'I'))
NbV++;
return NbV; }

/*****************/
/* Fonction "NombreDeVoisin" cherche le nombre de cellules */
/*   voisines occupées de la cellule courante */
/*****************/
long NombreDeVoisin1(char ***DomainePtr,long YF1,long XF1,long ZF1,const
long TailleY,const long TailleX,const long TailleZ){
long maximum (long , long);
long minimum (long , long);

long GrandX,GrandZ,PetitX,PetitZ,NbV;

PetitX = maximum(0,XF1-1);
PetitZ = maximum(0,ZF1-1);
GrandX = minimum(TailleX-1,XF1+1);
GrandZ = minimum(TailleZ-1,ZF1+1);
NbV = 0;
for (int CompteurX = PetitX; CompteurX <= GrandX; CompteurX++)
for (int CompteurZ = PetitZ; CompteurZ <= GrandZ; CompteurZ++)
if((DomainePtr [YF1] [CompteurX] [CompteurZ]=='C') || (DomainePtr
[YF1] [CompteurX] [CompteurZ]== 'I'))
NbV++;
return NbV; }

/*****************/
/* Fonction "Congélation" cherche la cellule qui */
/*   recevra la gouttelette gelée */
/*****************/

```

```

void Congelation(char ***DomainePtr, long YF1, long XF1, long ZF1, const long
TailleY, const long TailleX, const long TailleZ, long ControlNbGte1, double
Precip1, long &PlusPetitX1, long &PlusGrdX1, long &PlusPetitY1, long
&PlusGrdY1, double AngleImpact1)
{
long NombreDeVoisin(char ***, long , long , long , const long , const long
, const long );

long ControlVar, NbV2, NbreCellMaxVoisin;

long Voisinage[5][5][5],
MaxVoisin [125][3];
ControlVar = 0;

if ((XF1>=n) && (YF1>=n) && (ZF1>=n) && (XF1<=(TailleX-1-n)) && (YF1<=(TailleY-1-
n)) && (ZF1<=(TailleZ-1-n)))
{
for (int YCompteur = YF1-n; YCompteur <= YF1+n; YCompteur++)
for (int XCompteur = XF1-n; XCompteur <= XF1+n; XCompteur++)
for (int ZCompteur = ZF1-n; ZCompteur <= ZF1+n; ZCompteur++)
{
if ((DomainePtr[YCompteur][XCompteur][ZCompteur]== 'C') || (DomainePtr
[YCompteur][XCompteur][ZCompteur]== 'I'))
Voisinage[YCompteur-YF1+n][XCompteur-XF1+n][ZCompteur-ZF1+n] = -1;
else
{
NbV2
NombreDeVoisin(DomainePtr, YCompteur, XCompteur, ZCompteur, TailleY, TailleX, T
ailleZ);
Voisinage [YCompteur-YF1+n] [XCompteur-XF1+n] [ZCompteur-ZF1+n] = NbV2;
if (NbV2 > ControlVar)
ControlVar = NbV2;
}
}
NbreCellMaxVoisin = 0;
for (int YCompteur = 0; YCompteur < (2*n+1); YCompteur++)
for (int XCompteur = 0; XCompteur < (2*n+1); XCompteur++)
for (int ZCompteur = 0; ZCompteur < (2*n+1); ZCompteur++)
if (Voisinage [YCompteur][XCompteur][ZCompteur] == ControlVar)
{
MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][0] = (YCompteur+YF1-n);
MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][1] = (XCompteur+XF1-n);
MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][2] = (ZCompteur+ZF1-n);
NbreCellMaxVoisin++;
}
if (NbreCellMaxVoisin == 1)
{
if (ControlNbGte1 <= (int(Precip1*cos(AngleImpact1))*XTaille*ZTaille))
{
DomainePtr [MaxVoisin[0][0]] [MaxVoisin[0][1]] [MaxVoisin[0][2]] = 'I';
}
if (MaxVoisin[0][0] < PlusPetitY1)
PlusPetitY1 = MaxVoisin[0][0];
}
}

```

```

if (MaxVoisin[0][1] < PlusPetitX1)
PlusPetitX1 = MaxVoisin[0][1];
if (MaxVoisin[0][0] > PlusGrdY1)
PlusGrdY1 = MaxVoisin[0][0];

if (MaxVoisin[0][1] > PlusGrdX1)
PlusGrdX1 = MaxVoisin[0][1];
}
else
{
NbreCellMaxVoisin = rand()%NbreCellMaxVoisin;
if (ControlNbGte1 <= (int(Precip1*cos(AngleImpact1))*(XTaille)*ZTaille))
{
DomainePtr
[MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][0]] [MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][1]] [MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][2]] = 'I';
}

if (MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][0] < PlusPetitY1)
PlusPetitY1 = MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][0];

if (MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][1] < PlusPetitX1)
PlusPetitX1 = MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][1];
if (MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][0] > PlusGrdY1)
PlusGrdY1 = MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][0];

if (MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][1] > PlusGrdX1)
PlusGrdX1 = MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][1];
}
}
}
}
***** MERSENNE.CPP *****
***** /*****
/* Random Number generator 'Mersenne Twister'
 */
***** *****/
**/


void TRandomMersenne::RandomInit(uint32 seed) {
    // re-seed generator
    mt[0] = seed;
    for (mti=1; mti < MERS_N; mti++) {
        mt[mti] = (1812433253UL * (mt[mti-1] ^ (mt[mti-1] >> 30)) + mti); }

    // detect computer architecture
    union {double f; uint32 i[2];} convert;
    convert.f = 1.0;
    // Note: Old versions of the Gnu g++ compiler may make an error here,
    // compile with the option -fenum-int-equiv to fix the problem
    if (convert.i[1] == 0x3FF00000) Architecture = LITTLEENDIAN;
    else if (convert.i[0] == 0x3FF00000) Architecture = BIGENDIAN;
    else Architecture = NONIEEE;
}

```

```

void TRandomMersenne::RandomInitByArray(uint32 seeds[], int length) {
    // seed by more than 32 bits
    int i, j, k;
    RandomInit(19650218UL);
    if (length <= 0) return;
    i = 1; j = 0;
    k = (MERS_N > length ? MERS_N : length);
    for (; k; k--) {
        mt[i] = (mt[i] ^ ((mt[i-1] ^ (mt[i-1] >> 30)) * 1664525UL)) +
seeds[j] + j;
        i++; j++;
        if (i >= MERS_N) {mt[0] = mt[MERS_N-1]; i=1;}
        if (j >= length) j=0;
    }
    for (k = MERS_N-1; k; k--) {
        mt[i] = (mt[i] ^ ((mt[i-1] ^ (mt[i-1] >> 30)) * 1566083941UL)) - i;
        if (++i >= MERS_N) {mt[0] = mt[MERS_N-1]; i=1;}
    }
    mt[0] = 0x80000000UL; // MSB is 1; assuring non-zero initial array

    uint32 TRandomMersenne::BRandom() {
        // generate 32 random bits
        uint32 y;

        if (mti >= MERS_N) {
            // generate MERS_N words at one time
            const uint32 LOWER_MASK = (1LU << MERS_R) - 1; // lower MERS_R bits
            const uint32 UPPER_MASK = -1L << MERS_R;           // upper (32 - MERS_R)
bits
            static const uint32 mag01[2] = {0, MERS_A};

            int kk;
            for (kk=0; kk < MERS_N-MERS_M; kk++) {
                y = (mt[kk] & UPPER_MASK) | (mt[kk+1] & LOWER_MASK);
                mt[kk] = mt[kk+MERS_M] ^ (y >> 1) ^ mag01[y & 1];
            }

            for (; kk < MERS_N-1; kk++) {
                y = (mt[kk] & UPPER_MASK) | (mt[kk+1] & LOWER_MASK);
                mt[kk] = mt[kk+(MERS_M-MERS_N)] ^ (y >> 1) ^ mag01[y & 1];
            }

            y = (mt[MERS_N-1] & UPPER_MASK) | (mt[0] & LOWER_MASK);
            mt[MERS_N-1] = mt[MERS_M-1] ^ (y >> 1) ^ mag01[y & 1];
            mti = 0;
        }

        y = mt[mti++];

        // Tempering (May be omitted):
        y ^= y >> MERS_U;
        y ^= (y << MERS_S) & MERS_B;
        y ^= (y << MERS_T) & MERS_C;
        y ^= y >> MERS_L;
        return y;
    }
}

```

```

double TRandomMersenne::Random() {
    // output random float number in the interval 0 <= x < 1
    union {double f; uint32 i[2];} convert;
    uint32 r = BRandom(); // get 32 random bits
    // The fastest way to convert random bits to floating point is as
    follows:
    // Set the binary exponent of a floating point number to 1+bias and set
    // the mantissa to random bits. This will give a random number in the
    // interval [1,2). Then subtract 1.0 to get a random number in the
    interval
    // [0,1). This procedure requires that we know how floating point
    numbers
    // are stored. The storing method is tested in function RandomInit and
    saved
    // in the variable Architecture. The following switch statement can be
    // omitted if the architecture is known. (A PC running Windows or Linux
    uses
    // LITTLEENDIAN architecture):
    switch (Architecture) {
    case LITTLEENDIAN:
        convert.i[0] = r << 20;
        convert.i[1] = (r >> 12) | 0x3FF00000;
        return convert.f - 1.0;
    case BIGENDIAN:
        convert.i[1] = r << 20;
        convert.i[0] = (r >> 12) | 0x3FF00000;
        return convert.f - 1.0;
    case NONIEEE: default:
    ;
    // This somewhat slower method works for all architectures, including
    // non-IEEE floating point representation:
    return (double)r * (1.0/((double)(uint32)(-1L)+1.));
}

int TRandomMersenne::IRandom(int min, int max) {
    // output random integer in the interval min <= x <= max
    int r;
    r = int((max - min + 1) * Random()) + min; // multiply interval with
    random and truncate
    if (r > max) r = max;
    if (max < min) return 0x80000000;
    return r;
}

```

**ANNEXE D: Givrage d'un cylindre en rotation (trajectoire horizontale des gouttelettes)**

```

#pragma hdrstop

#include <cstdio>
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <cstdlib>
#include <ctime> //défini le temps
#include <iomanip>
#include <cmath>
#include "randomc.h" //défini la classe pour le
générateur de nombre aléatoire uniforme
using namespace std;

const double Diametre = 35.0; //diamètre du cylindre,mm
const long XTaille = 1000; // largeur du domaine suivant l'axe
X(largeurdomaine en mm)
const long YTaille = 500; // hauteur du domaine suivant l'axe Y
(hauteur du domaine en mm)
const long ZTaille = 200; // longueur du domaine suivant l'axe
Z (longueur du domaine en mm)
const long n = 2; // parametre de congélation qui emule
les tensions de surface
const double Kref = 0.02415; // conductivité thermique de l'air à Tref
(T° de ref est 0°C),W/m/K
const double Muref = 1.4964E-5; // viscosité dynamique de l'air de
ref,Pa.s
const double S1 = 194.44; //constante de Sutherland, K
const double S2 = 120.0; //constante pour calculer la
viscosité dynamique de l'air, K
const double Tref = 273.16; // température à la surface du
cylindre givré, K
const double RhoAir = 1.293; // densité de l'air kg/m3
const double RhoEau = 1000; // masse volumique de l'eau, kg/m3
const double Ca = 1004.5; // chaleur spécifique de l'air,J/kg/K
const double Ce = 4217.7; // chaleur spécifique de l'eau,J/kg/K
const double Dref = 2.282E-5; // coefficient de diffusion de la vapeur
dans l'air, à 20°C et 101,3 kPa, m*m/s
const double Pref = 101300; // pression de référence, Pa
const double Ra = 287.0; // constante gaz parfait pour l'air,
J/kg/K
const double Rv = 461.5; //constante de gaz parfait pour la
vapeur d'eau,J/kg/K
const double PvsatRef = 610.8; //pression de vapeur d'eau saturée à
Tref
const double Lv = 2501300; //chaleur latente de vaporisation,
J/kg
const double Epsilon = 0.622; //masse moléculaire de la vapeur
d'eau(18.01 g/mole)/M Mol de l'air (28.97 g/mole)

```

```

const double Lf = 334400; // chaleur latente de fusion de l'eau J/kg
const double PI = 3.1415926; // nombre PI
const double Mcr = 0.0032; // 0.000065; // 0.0032; // masse critique de
l'eau pendante kg/m
const double DeltaT = 0.1;
const double DeltaL = 0.001;

int32 seed = 1000; //valeur de départ heure courante
TRandomMersenne rg(seed); //déclaration instance du générateur de
nbre aléatoire

long maximum (long , long);
long minimum (long , long);
long NombreDeVoisin(char ***,long ,long ,long ,const long ,const long
,const long );
long NombreDeVoisin1(char ***,long ,long ,long ,const long ,const long
,const long );
void Congelation(char ***,long ,long ,long ,const long ,const long ,const
long ,long ,double , long &,long &,long &,long &);

int main()
{
    srand(seed);

    //déclaration des fichiers de sortie
    fstream stream1 ("Glace41.vtk", ios::out),
    stream7 ("Cable4.vtk", ios::out),
    stream8 ("Résultats4.txt", ios::out),
    stream9 ("Glace4.vtk", ios::out),
    stream10 ("LongeurGlacons4.txt", ios::out),
    stream11 ("AngleGlacons4.txt", ios::out);

    bool Stop;

    long Control3,Control2, //Control1, //Variable de control des boucles
    ControlNbGte,
    Glace1, //couche de glace 1
    NbVoisin, //nombre de voisins d'une gouttelette pendant son
    déplacement
    NombrePointsCyl,
    PDCControl, //variable de contrôle du délestage
    RayonInt, //Rayon du cylindre sans la partie flottante
    X,Y,Z,Xtp,Ytp,Ztp, //Coordonnées de points dans le domaine
    XCentre, //abscisse de l'axe central du cylindre
    YCentre, //ordonnée de l'axe central du cylindre
    XCalcule,
    YCalcule,
    Y1,Y2, //ordonnées utilisées pour tracer les faces circulaires
    du cylindre
    PlusPetitX,
    PlusGrdX,
    PlusGrdY,

```

```

PlusPetitY,
NbreDec,
PartDelest; // nombre de particule perdues

double NombreTotalGouttes, //nombre total de gouttelettes
NombreGouttesIntercep, //nombre gouttelettes interceptees
Ctrl_NombreGouttesGelees,
Ctrl_NombreGouttesGelees1,
NombreTotalGouttesDec, // nombre de gouttelettes par decallage
//aY,bX, // equation d'une droite ax+b=y simule la trajectoire des
gouttelettes
VitesseRotCyl, // vitesse de rotation du cylindre et tour par minute
ChoixAnglRot, // Choix de l'angle pour le mouvement angulaire
NbreDecalageCylGiv, // nombre de décallage du cylindre givré
AngleInclinaisonCabl, //angle d'inclinaison du câble
VitesseVent, //vitesse du vent
B, //Y*Y+C*Y+B(X)=0 (1), équation découlant de l'équation d'un cercle
Discriminant, //discriminant de l'équation (1)
DurPrecip, //duree du givrage
ProbC, //probabilite de congelation d'une gouttelette
PD, //parametre de delestage
Precip, //intensité de precipitation en mm/h
PxG, //probabilite que la gouttelette d'eau se deplace d'une cellule
vers la gauche
PyH, //probabilite que la gouttelette d'eau se deplace d'une cellule
vers le haut
PyB, //probabilite que la gouttelette d'eau se deplace d'une cellule
vers le bas
PzAr, //probabilite que la gouttelette d'eau se deplace d'une cellule
vers l'arriere
PzAv, //probabilite que la gouttelette d'eau se deplace d'une cellule
vers l'avant
r1, //nombre aleatoire
Ka, //conductivité thermique de l'air à Ta, W/m/K
Ta, // température de l'air en °C
Mua, //viscosité dynamique de l'air à Ta, Pa.s
NRe, //nombre de Reynolds
ARe, //constante pour calculer le nombre de Nusselt, NNu = ARe*(NRe-
exposantMRe)
MRe, //constante pour calculer le nombre de Reynolds;
NNu, //nombre de nusselt
Hc, //coefficient de transfert thermique par convection, (W/m*m/K)
HeatConv, // perte de chaleur par convection, (W/m*m)
HeatEv, // perte de chaleur par évaporation, (W/m*m)
HeatGte, //perte de chaleur due à l'élévation de la température de la
gouttelette
HeatTot, //perte de chaleur totale
NPr, //nombre de Prandtl
PressAirA, // pression de l'air à température Ta
Dva, //coefficient de diffusion thermique de l'air à la température
Ta, m/(s*s)
Sc, //nombre de Schmidt
PvsatA, //pression de vapeur saturée à Ta

```

```

Rayon,           //rayon du cylindre
RayonCalcule,
AngleCalcule,      // angle calculé par rapport à l'axe des abscisse
pour localisé un point
Para,
CelK,             // longueur maximale
MassIce,           //masse de glace accumulée
SommeAngle,
SommeLongueur,
VolumeCyl,         //volume du cylindre nu
VolumeCylGiv,      //volume du cylindre givré
RayonCylGiv,       // rayon équivalent du cylindre givré
EpRadEq;           // épaisseur radiale de l'accréation de glace

struct point{
int ord;
int absc;};

char ***Domaine ; //déclaration du domaine de simulation
char ***DomaineRot ; //déclaration du domaine de simulation
double *AngleGlacon ; //Angle des glacons
double *LongGlacon ; //longueur des glacons
point *BoutGlacon ; //bout des glacons

Domaine = new char **[YTaille];
for (int i=0; i< YTaille;i++)
Domaine[i]= new char *[XTaille];
for (int i =0;i< YTaille;i++)
for (int j=0; j<XTaille; j++)
Domaine[i] [j]=new char[ZTaille];

DomaineRot = new char **[YTaille];
for (int i=0; i< YTaille;i++)
DomaineRot[i]= new char *[XTaille];
for (int i =0;i< YTaille;i++)
for (int j=0; j<XTaille; j++)
DomaineRot[i] [j]=new char[ZTaille];

AngleGlacon = new double [ZTaille];
LongGlacon = new double [ZTaille];
BoutGlacon = new point [ZTaille];

// initialisation du domaine

NombrePointsCyl = 0;
for (int YCompteur=0; YCompteur < YTaille; YCompteur++)
for (int XCompteur=0; XCompteur < XTaille; XCompteur++)
for (int ZCompteur = 0; ZCompteur < ZTaille; ZCompteur++)
Domaine [YCompteur] [XCompteur] [ZCompteur]='V';

```

```

for (int YCompteur=0; YCompteur < YTaille; YCompteur++)
for (int XCompteur=0; XCompteur < XTaille; XCompteur++)
for (int ZCompteur = 0; ZCompteur < ZTaille; ZCompteur++)
DomaineRot [YCompteur] [XCompteur] [ZCompteur] = 'V';

//initialisation des variables

ControlNbGte = 0;
Ctrl_NombreGouttesGelees = 0.0;
Ctrl_NombreGouttesGelees1 = 0.0;
NombreGouttesIntercep = 0.0;
PartDelest=0;
Glace1 = 0;
NbVoisin = 0;
PlusPetitX = XTaille;
PlusGrdX = 0;
PlusGrdY = 0;
PlusPetitY = YTaille;
VolumeCyl = 0.0;
VolumeCylGiv = 0.0;
RayonCylGiv = 0.0;
EpRadEq = 0.0;

Ta = -10.0 + 273.16;
VitesseVent = 10.0;
AngleInclinaisonCabl = 0.0;
Precip = 64.8;
DurPrecip = 1.0;
YCentre = 250;
XCentre = 300;
ChoixAnglRot = 10.0;
VitesseRotCyl = 1; // en tour par minute
NbreDecalageCylGiv = ceil(VitesseRotCyl*360*DurPrecip*60/ChoixAnglRot);
//calcul du nombre de décallage du cylindre givré pendant la simulation
ChoixAnglRot = ChoixAnglRot*PI/180.0;

//Calcul du nombre total de gouttelettes
NombreTotalGouttes = ceil(YTaille*ZTaille*DurPrecip*Precip/0.9);
NombreTotalGouttesDec=ceil((DurPrecip*Precip*YTaille*ZTaille/0.9)/NbreDecalageCylGiv);

*****CALCULS PRÉALABLES*****/

// Calcul de la conductivité thermique de l'air à la température
ambiante, Ta
Ka = Kref * pow((Ta/Tref), (3.0/2.0)) * (Tref+S1)/(Ta+S1);

// Calcul de la viscosité dynamique de l'air thermique à la température
ambiante, Ta

```

```

Mua = Muref * pow(Ta,1.5)/(Ta+S2);

//Calcul du nombre de Reynolds
NRe = (Diametre * 0.001) * RhoAir * VitesseVent/Mua;

// choix des constantes pour calculer le nbre de Nusselt par rapport au
// nombre de Reynolds
if(NRe > 40000){
  ARe = 0.024;
  MRe = 0.805;
} else if(NRe > 4000){
  ARe = 0.174;
  MRe = 0.618;
} else if (NRe > 40){
  ARe = 0.615;
  MRe = 0.466;
} else if (NRe > 4){
  ARe = 0.821;
  MRe = 0.385;
} else{
  ARe = 0.891;
  MRe = 0.330;

//calcul du nombre de Nusselt
NNu = ARe*pow(NRe,MRe);
//calcul du coefficient de transfert thermique par convection
Hc =Ka*NNu/(Diametre*0.001);
//Perte de chaleur par convection
HeatConv = Hc*(Tref - Ta);
//calcul du nombre de Prandtl
NPr = Mua*Ca/Ka;
//calcul de la pression de l'air à Ta
PressAirA = RhoAir*Ra*Ta;
//calcul du coefficient de diffusion thermique de l'air à Ta
Dva = Dref*(Pref/PressAirA)*pow((Ta/Tref),(3.0/2.0));
//calcul du nombre de schmidt
Sc = Mua/(RhoAir*Dva);
// calcul de la pression de vapeur saturée à Ta
PvsatA = PvsatRef*exp(Lv*(Ta-273.16)/(Rv*Tref*Ta));
// Perte de chaleur par diffusion thermique
HeatEv = Hc*pow((NPr/Sc),0.63)*Epsilon*Lv*(PvsatRef-
PvsatA)/(PressAirA*Ca);
//perte de chaleur due à l'élévation de la température de la gouttelette
HeatGte =
(NombreGouttesIntercep/NombreTotalGouttes)*RhoEau*(Precip/3600000)*Ce*(Tr
ef-Ta);

// Perte totale de chaleur
HeatTot = HeatConv + HeatEv + HeatGte;

// calcul du rayon du cylindre en valeur entiere
Rayon = Diametre/2.0;
RayonInt= int(Rayon);

```

```

for (int Compteur1 = 0; Compteur1 < ZTaille; Compteur1++){
BoutGlacon[Compteur1].absc = XCentre;
BoutGlacon[Compteur1].ord = YCentre + RayonInt;
LongGlacon[Compteur1] = Rayon;
AngleGlacon[Compteur1] = 0.0; }

//Tracé du cylindre dans le domaine
for (int Compteur1 = (XCentre - RayonInt); Compteur1 <= (XCentre + RayonInt); Compteur1++){
B = -pow(Rayon,2.0)+ pow(double(Compteur1-XCentre),2.0)+ pow(double(YCentre),2);
Discriminant = pow((2.0*double(YCentre)),2)-4.0*B;
Y1 = int(fabs((-2*YCentre - sqrt(Discriminant))/2.0));
Y2 = int(fabs((-2*YCentre+sqrt(Discriminant))/2.0));

for (int Compteur2 = Y2; Compteur2 <= Y1; Compteur2++)
for (int Compteur3 = 0; Compteur3 < ZTaille; Compteur3++){
Domaine [Compteur2] [Compteur1] [Compteur3]='C';
DomaineRot [Compteur2] [Compteur1] [Compteur3]='C';
NombrePointsCyl++;
if (Compteur2 < PlusPetitY)
PlusPetitY = Compteur2;
if (Compteur1 < PlusPetitX)
PlusPetitX = Compteur1;
if (Compteur2 > PlusGrdY)
PlusGrdY = Compteur2;
if (Compteur1 > PlusGrdX)
PlusGrdX = Compteur1;
} }

stream7 << "# vtk DataFile Version 1.0" << endl;
stream7 << "Cable stuff" << endl;
stream7 << "ASCII" << endl;
stream7 << "DATASET POLYDATA" << endl;
stream7 << "POINTS " << NombrePointsCyl << " FLOAT" << endl;

for (int Y_compteur = 0; Y_compteur < YTaille; Y_compteur++)
for (int X_compteur = 0; X_compteur < XTaille; X_compteur++)
for (int Z_compteur = 0; Z_compteur < ZTaille; Z_compteur++)
if (Domaine [Y_compteur] [X_compteur] [Z_compteur]=='C'){
VolumeCyl++;
stream7 << X_compteur << " " << YTaille-Y_compteur << " " << Z_compteur << endl;
stream7 << "VERTICES 1 " << NombrePointsCyl+1 << endl;
stream7 << NombrePointsCyl << endl;

for (int i=0;i < NombrePointsCyl;i++){
stream7 << i << endl; }

```

```

/*AFFICHAGE DES CALCULS DANS LE FICHIER RÉSULTATS*/

stream8 << "      RÉSULTATS      " << endl;
stream8 << "*****" << endl;

stream8 << "      " << endl;
stream8 << "      " << endl;
stream8 << "      " << endl;
stream8 << " Température de l'air : " << Ta-273.16 << " °C " << endl;
stream8 << " Intensité des précipitations : " << Precip << " mm/h " << endl;
stream8 << " Durée du givrage : " << DurPrecip << " h " << endl;
stream8 << " Vitesse du vent : " << VitesseVent << " m/s " << endl;
stream8 << " Vitesse de rotation du cylindre : " << VitesseRotCyl <<
tr/min " << endl;
stream8 << " Nombre total de gouttelettes d'eau : " << NombreTotalGouttes
<< endl;
stream8 << " Angle d'inclinaison du câble : " << AngleInclinaisonCabl << "°"
<< endl;
stream8 << " Diamètre du cylindre : " << Diametre << " mm " << endl;
stream8 << " Conductivité thermique de l'air à " << Ta-273.16 << "°C: " << Ka
<< " W/m/K " << endl;
stream8 << " Viscosité dynamique de l'air à " << Ta-273.16 << "°C: " << Mua
<< " Pa.s " << endl;
stream8 << " Nombre de Reynolds: " << NRe << endl;
stream8 << " Nombre de Nusselt: " << NNu << " ( " << ARe << , " << MRe << " )
" << endl;
stream8 << " Coef de transfert therm conv: " << Hc << " W/m2/K " << endl;
stream8 << " Perte de chaleur par convection: " << HeatConv << " W/(m2) "
<< endl;
stream8 << " Perte de chaleur par diffusion thermique: " << HeatEv <<
" W/(m2) " << endl;
stream8 << " Perte de chaleur couche de glace et gouttelettes incidentes:
" << HeatGte << " W/(m2) " << endl;
stream8 << " Perte de chaleur Totale: " << HeatTot << " W/(m2) " << endl;
stream8 << " Nombre de Prandtl: " << NPr << endl;
stream8 << " Pression de l'air à " << Ta-273.16 << " : " << PressAirA << " Pa "
<< endl;
stream8 << " coefficient de diffusion thermique de l'air à " << Ta-273.16
<< "°C : " << Dva << " m2/s " << endl;
stream8 << " Nombre de Schmidt: " << Sc << endl;
stream8 << " Pression de vapeur saturée à " << Ta-273.16 << "°C: " <<
PvsatA << " Pa " << endl;
stream8 << " Pression de vapeur saturée à " << Tref-273.16 << "°C: " <<
PvsatRef << " Pa " << endl;

NbreDec = 0;

```

```

while ((ControlNbGte < NombreTotalGouttes) && (NbreDec<NbreDecalageCylGiv) )
{ // Contrôle du givrage
for (int minIndice = 0; minIndice < NombreTotalGouttesDec; minIndice++) {
//accumulation de glace par décalage angulaire
// Tirage d'une nouvelle gouttelette

Stop = false;
PDControl = 0;

// calcul de la trajectoire des gouttelettes leur son imapct
X = XTaille-1;
Z = int(rg.Random()*(ZTaille-1-n));
Y = int(rg.Random()*(YTaille-1-n));
Control2 = 0;
while (Control2 == 0){
NbVoisin = NombreDeVoisin(Domaine,Y,X,Z,YTaille,XTaille,ZTaille);
if (NbVoisin >= 1){
Domaine[Y][X][Z] ='E';
NombreGouttesIntercep++;
Control2 = 1;
Stop = true ;
}
else{
X--;
if (X < n){
Control2 = 1;}}}

if (Stop == true){
Control3 = 0;

// Calcul des probabilites

CelK = (PlusGrdX - PlusPetitX)/2 ;
Para = RhoEau*Lf*Precip/3600000;
if (HeatTot >= Para){
ProbC = 1.0;}
else{
ProbC = 1.0-pow((1.0-HeatTot/Para),(1/CelK));}

if (ProbC != 1){
PD = 0.5*Mcr/((Precip/3600000)*RhoEau*DeltaT*DeltaL*pow((1-ProbC),CelK));}
else{
PD = 0;}

PxG = (0.07322*VitesseVent*VitesseVent)*(1-ProbC)/(2 +
0.07322*VitesseVent*VitesseVent);
PyB = (1-ProbC)/(2 + 0.07322*VitesseVent*VitesseVent);
PzAr = (1-ProbC)/((2 + 0.07322*VitesseVent*VitesseVent)*3);           PzAv =
(1-ProbC)/((2 + 0.07322*VitesseVent*VitesseVent)*3);
PyH = (1-ProbC)/((2 + 0.07322*VitesseVent*VitesseVent)*3);

```

```

// Accumulation de glace

while ( Control3 == 0){

r1 = rg.Random();
if (r1 <= ProbC){
if ((X>=n)&&(Y>=n)&&(Z>=n)&&(X<=(XTaille-1-n))&&(Y<=(YTaille-1-n))&&(Z<=(ZTaille-1-n))){
Congelation(Domaine,Y,X,Z,YTaille,XTaille,ZTaille,ControlNbGte,Precip,PlusPetitX,PlusGrdX,PlusPetitY,PlusGrdY);
Ctrl_NombreGouttesGelees1++;
Control3 = 1;

//perte de chaleur due à l'élévation de la température de la gouttelette
HeatGte=NombreGouttesIntercep/NombreTotalGouttes)*RhoEau*(Precip/3600000)*Ce*(Tref-Ta);

// Perte totale de chaleur
HeatTot = HeatConv + HeatEv + HeatGte;}}
```

else if (r1 <= (ProbC+PxG)) // Déplacement à gauche{

```

X--;
if (X < n){
X++;
PDControl++;
else{
NbVoisin = NombreDeVoisin(Domaine,Y,X,Z,YTaille,XTaille,ZTaille);
if ((Domaine[Y][X][Z]=='I') || (Domaine[Y][X][Z]=='C') || (NbVoisin==0)){
X++;
if ((Domaine[Y+1][X][Z]!='I')&&(Domaine[Y+1][X][Z]!='C')) {
PDControl++;
}
else{
Domaine[Y][X+1][Z]='V';
Domaine[Y][X][Z] = 'E';
if ((Domaine[Y+1][X][Z]!='I')&&(Domaine[Y+1][X][Z]!='C')) {
PDControl++;
}}}}
```

else if (r1 <= (ProbC+PxG+PzAv)) // Déplacement en avant{

```

Z++;
if (Z>= (ZTaille-n)){
Ztp = n;
Ytp = Y;
Xtp = X;
NbVoisin = NombreDeVoisin(Domaine,Ytp,Xtp,Ztp,YTaille,XTaille,ZTaille);
if((Domaine[Ytp][Xtp][Ztp]!='I')&&(Domaine[Ytp][Xtp][Ztp]!='C')&&(NbVoisin!=0)){
Domaine[Y][X][Z-1]='V';
Z = Ztp;
Domaine[Y][X][Z] = 'D';
if ((Domaine[Y+1][X][Z]!='I')&&(Domaine[Y+1][X][Z]!='C')) {
PDControl++;
}
else{
```

```

Z--;
if ((Domaine[Y+1][X][Z] != 'I') && (Domaine[Y+1][X][Z] != 'C')) {
PDCControl++;}}
else{
NbVoisin = NombreDeVoisin(Domaine, Y, X, Z, YTaille, XTaille, ZTaille);
if ((Domaine[Y][X][Z] == 'I') || (Domaine[Y][X][Z] == 'C') || (NbVoisin == 0)) {
Z--;
if ((Domaine[Y+1][X][Z] != 'I') && (Domaine[Y+1][X][Z] != 'C')) {
PDCControl++;}}
else{
Domaine[Y][X][Z-1] = 'V';
Domaine[Y][X][Z] = 'D';
if ((Domaine[Y+1][X][Z] != 'I') && (Domaine[Y+1][X][Z] != 'C')) {
PDCControl++;}}}

else if (r1 <= (ProbC+PxG+PzAv+PzAr)) // Déplacement en arrière{
Z--;
if (Z < n) {
Ztp = ZTaille - 1 - n;
Ytp = Y;
Xtp = X;
NbVoisin = NombreDeVoisin(Domaine, Ytp, Xtp, Ztp, YTaille, XTaille, ZTaille);
if ((Domaine[Ytp][Xtp][Ztp] != 'I') && (Domaine[Ytp][Xtp][Ztp] != 'C') && (NbVoisin != 0)) {
Domaine[Y][X][Z+1] = 'V';
Z = Ztp;
Domaine[Y][X][Z] = 'D';
if ((Domaine[Y+1][X][Z] != 'I') && (Domaine[Y+1][X][Z] != 'C')) {
PDCControl++;}}
else{
Z++;
if ((Domaine[Y+1][X][Z] != 'I') && (Domaine[Y+1][X][Z] != 'C')) {
PDCControl++;}}
}
else{
NbVoisin = NombreDeVoisin(Domaine, Y, X, Z, YTaille, XTaille, ZTaille);
if ((Domaine[Y][X][Z] == 'I') || (Domaine[Y][X][Z] == 'C') || (NbVoisin == 0)) {
Z++;
if ((Domaine[Y+1][X][Z] != 'I') && (Domaine[Y+1][X][Z] != 'C')) {
PDCControl++;}}
else{
Domaine[Y][X][Z+1] = 'V';
Domaine[Y][X][Z] = 'D';
if ((Domaine[Y+1][X][Z] != 'I') && (Domaine[Y+1][X][Z] != 'C')) {
PDCControl++;}}}

else if (r1 <= (ProbC+PxG+PzAv+PzAr+PyB)) // Déplacement en bas{
Y++;
if (Y > (YTaille - n))
{
Y--;
PDCControl++;}

```



```

DomaineRot [YCalcule] [XCalcule] [Z_compteur] = 'I';}

else if ((X_compteur <= XCentre)&&(Y_compteur < YCentre))
{
RayonCalcule = sqrt(pow(double(YCentre-Y_compteur),2) +
pow(double(XCentre-X_compteur),2));
AngleCalcule = atan2(abs(double(YCentre-Y_compteur)),abs(double(XCentre-
X_compteur))) - ChoixAnglRot;
XCalcule = int(fabs(XCentre - RayonCalcule*cos(AngleCalcule)));
YCalcule = int(fabs(YCentre - RayonCalcule*sin(AngleCalcule)));
DomaineRot [YCalcule] [XCalcule] [Z_compteur] = 'I';}

else if ((X_compteur < XCentre)&&(Y_compteur >= YCentre)){
RayonCalcule = sqrt(pow(double(YCentre-Y_compteur),2) +
pow(double(XCentre-X_compteur),2));
AngleCalcule = atan2(abs(double(YCentre-Y_compteur)),abs(double(XCentre-
X_compteur))) + ChoixAnglRot;
XCalcule = int(abs(XCentre - RayonCalcule*cos(AngleCalcule)));
YCalcule = int(abs(YCentre + RayonCalcule*sin(AngleCalcule)));
DomaineRot [YCalcule] [XCalcule] [Z_compteur] = 'I';}

else if ((X_compteur >= XCentre)&&(Y_compteur > YCentre)){
RayonCalcule = sqrt(pow(double(YCentre-Y_compteur),2) +
pow(double(XCentre-X_compteur),2));
AngleCalcule = atan2(abs(double(YCentre-Y_compteur)),abs(double(XCentre-
X_compteur))) - ChoixAnglRot;
XCalcule = int(abs(XCentre + RayonCalcule*cos(AngleCalcule)));
YCalcule = int(abs(YCentre + RayonCalcule*sin(AngleCalcule)));
DomaineRot [YCalcule] [XCalcule] [Z_compteur] = 'I';
Domaine [Y_compteur] [X_compteur] [Z_compteur] = 'V';}

NbreDec++;

for (int YCompteur=0; YCompteur < YTaille; YCompteur++)
for (int XCompteur=0; XCompteur < XTaille; XCompteur++)
for (int ZCompteur = 0; ZCompteur < ZTaille; ZCompteur++)
Domaine [YCompteur] [XCompteur] [ZCompteur] = DomaineRot
[YCompteur] [XCompteur] [ZCompteur];}

for(int Y_compteur = 0; Y_compteur < YTaille; Y_compteur++)
for (int X_compteur = 0; X_compteur < XTaille; X_compteur++)
for (int Z_compteur = 0; Z_compteur < ZTaille; Z_compteur++)

if (Domaine [Y_compteur] [X_compteur] [Z_compteur]=='I'){
Ctrl_NombreGouttesGelees++;
Glace1++;}

VolumeCylGiv = Ctrl_NombreGouttesGelees + VolumeCyl;
MassIce = Ctrl_NombreGouttesGelees * 9e-7;

RayonCylGiv = Diametre/2.0*sqrt(VolumeCylGiv/VolumeCyl);

```

```

EpRadEq = RayonCylGiv - Diametre/2.0;

stream1 << "# vtk DataFile Version 1.0" << endl;
stream1 << "Glace1 stuff" << endl;
stream1 << "ASCII" << endl;
stream1 << "DATASET POLYDATA" << endl;
stream1 << "POINTS " << Glace1 << " FLOAT" << endl;

stream9 << "# vtk DataFile Version 1.0" << endl;
stream9 << "Glace stuff" << endl;
stream9 << "ASCII" << endl;
stream9 << "DATASET POLYDATA" << endl;
stream9 << "POINTS " << Ctrl_NombreGouttesGelees << " FLOAT" << endl;

for (int Y_compteur = 0; Y_compteur < YTaille; Y_compteur++)
for (int X_compteur = 0; X_compteur < XTaille; X_compteur++)
for (int Z_compteur = 0; Z_compteur < ZTaille; Z_compteur++) {

if (Domaine [Y_compteur] [X_compteur] [Z_compteur] == 'I') {
stream1 << X_compteur << " " << YTaille - Y_compteur << " " << Z_compteur << endl;
stream9 << X_compteur << " " << YTaille - Y_compteur << " " << Z_compteur << endl;
if (BoutGlacon [Z_compteur].ord < Y_compteur) {
BoutGlacon [Z_compteur].ord = Y_compteur;
BoutGlacon [Z_compteur].absc = X_compteur; } }

stream1 << "VERTICES 1 " << Glace1 + 1 << endl;
stream1 << Glace1 << endl;

stream9 << "VERTICES 1 " << Ctrl_NombreGouttesGelees + 1 << endl;
stream9 << Ctrl_NombreGouttesGelees << endl;

for (long i=0; i < Glace1 ; i++) {
stream1 << i << endl; }

for (long i=0; i < Ctrl_NombreGouttesGelees ; i++) {
stream9 << i << endl; }

SommeLongueur = 0.0;
SommeAngle = 0.0;

for (int Compteur1 = 0; Compteur1 < ZTaille; Compteur1++) {
LongGlacon [Compteur1] = sqrt (pow (double (XCentre -
BoutGlacon [Compteur1].absc) , 2) + pow (double (BoutGlacon [Compteur1].ord -
YCentre) , 2));
AngleGlacon [Compteur1] = (180.0/PI)*atan (double ((XCentre -
BoutGlacon [Compteur1].absc) / (BoutGlacon [Compteur1].ord - YCentre)));
SommeLongueur = SommeLongueur + (LongGlacon [Compteur1] - RayonInt) ;
SommeAngle = SommeAngle + AngleGlacon [Compteur1];
stream10 << LongGlacon [Compteur1] << endl;
stream11 << AngleGlacon [Compteur1] << endl; }

stream8 << " Probabilité de congélation de la dernière gouttelette: " <<
ProbC << endl;

```

```

stream8 << " Paramètre de délestage de la dernière gouttelette: " << PD
<< endl;
stream8 << " Nombre de gouttes interceptées :" << NombreGouttesIntercep
<< endl;
stream8 << " Nombre de gouttesGelees :" << Ctrl_NombreGouttesGelees <<
endl;
stream8 << " Nombre de gouttes Gelees1 :" << Ctrl_NombreGouttesGelees1 <<
endl;
stream8 << " Nombre de gouttelettes perdues1 :" << PartDelest << endl;
stream8 << " Nombre de gouttelettes perdues2 :" << NombreGouttesIntercep
- Ctrl_NombreGouttesGelees << endl;
stream8 << " Fraction de gouttelettes gelées: " <<
100*double(Ctrl_NombreGouttesGelees)/double(NombreGouttesIntercep)
<< endl;
stream8 << " Masse de glace :" << MassIce*2.825<< endl;
stream8 << "Longueur glaçons :" << SommeLongueur/ZTaille << endl;
stream8 << "Angle glaçons :" << SommeAngle/ZTaille << endl;
stream8 << "PlusPetitX :" << PlusPetitX << endl;
stream8 << "PlusGrdX:" << PlusGrdX << endl;
stream8 << "PlusPetitY :" << PlusPetitY << endl;
stream8 << "PlusGrdY" << PlusGrdY << endl;
stream8 << "ProbC:" << ProbC << endl;
stream8 << "PxG:" << PxG << endl;
stream8 << "PyH:" << PyH << endl;
stream8 << "PzAr:" << PzAr << endl;
stream8 << "PzAv:" << PzAv << endl;
stream8 << "PyB:" << PyB << endl;
stream8 << " CelK:" << CelK << endl;
stream8 << " Perte de chaleur par convection:" << HeatConv << " W/(m2) "
<< endl;
stream8 << " Perte de chaleur par diffusion thermique: " << HeatEv <<
W/(m2) " << endl;
stream8 << " Perte de chaleur couche de glace et gouttelettes incidentes:
" << HeatGte << " W/(m2) " << endl;
stream8 << " Perte de chaleur Totale: " << HeatTot << " W/(m2) " << endl;
stream8 << " Para:" << Para << endl;
stream8 << " Épaisseur radiale équivalente:" << EpRadEq << " mm " << endl;
stream8 << " nombre de décalage:" << NbreDec << endl;
stream8 << " nombre de gouttelette par décalage:" << NombreTotalGouttesDec
<< endl;
stream8 << " nombre de décalage requis pour la durée de la simulation:" <<
NbreDecalageCylGiv << endl;

stream1.close();
stream7.close();
stream8.close();
stream9.close();
stream10.close();
stream11.close();

return 0;
}

```

```

/*****************/
/* Fonction "maximum" recherche le plus grand de deux entiers */
/*****************/
long maximum (long XF2, long XF3 )
{
long plusgrand;
if (XF2 >= XF3)
plusgrand = XF2;
else
plusgrand = XF3;
return plusgrand;
}
/*****************/
/* Fonction "minimum" recherche le plus petit de deux entiers*/
/*****************/
long minimum (long XF2, long XF3 )
{
long pluspetit;
if (XF2 <= XF3)
pluspetit = XF2;
else
pluspetit = XF3;
return pluspetit;
}
/*****************/
/* Fonction "NombreDeVoisin" cherche le nombre de cellules */
/* voisines occupées de la cellule courante */
/*****************/
long NombreDeVoisin(char ***DomainePtr,long YF1,long XF1,long ZF1,const
long TailleY,const long TailleX,const long TailleZ)
{
long maximum (long , long);
long minimum (long , long);

long GrandY,GrandX,GrandZ,PetitY,PetitX,PetitZ,NbV;

PetitY = maximum(2,YF1-1);
PetitX = maximum(2,XF1-1);
PetitZ = maximum(2,ZF1-1);
GrandY = minimum(TailleY-1-2,YF1+1);
GrandX = minimum(TailleX-1-2,XF1+1);
GrandZ = minimum(TailleZ-1-2,ZF1+1);
NbV = 0;
for(int CompteurY = PetitY; CompteurY <= GrandY; CompteurY++)
for (int CompteurX = PetitX; CompteurX <= GrandX; CompteurX++)
for (int CompteurZ = PetitZ; CompteurZ <= GrandZ; CompteurZ++)
if ((DomainePtr [CompteurY] [CompteurX] [CompteurZ]=='C') || (DomainePtr
[CompteurY] [CompteurX] [CompteurZ]== 'I'))
NbV++;
return NbV;
}

```



```

if (MaxVoisin[0][0] > PlusGrdY1)
PlusGrdY1 = MaxVoisin[0][0];

if (MaxVoisin[0][1] > PlusGrdX1)
PlusGrdX1 = MaxVoisin[0][1];}

else{
NbreCellMaxVoisin = rand()*NbreCellMaxVoisin;
if(ControlNbGte1 <= (int(Precip1)*(YTaille)*ZTaille)){
DomainePtr
[MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][0]][MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][1]][MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][2]] = 'I';

if (MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][0] < PlusPetitY1)
PlusPetitY1 = MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][0];

if (MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][1] < PlusPetitX1)
    PlusPetitX1 = MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][1];

    if (MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][0] > PlusGrdY1)
PlusGrdY1 = MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][0];

    if (MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][1] > PlusGrdX1)
PlusGrdX1 = MaxVoisin[NbreCellMaxVoisin][1];}}}

/********************* MERSENNE.CPP
*****
/* Random Number generator 'Mersenne Twister'
 */
***** */

void TRandomMersenne::RandomInit(uint32 seed) {
    // re-seed generator
    mt[0] = seed;
    for (mti=1; mti < MERS_N; mti++) {
        mt[mti] = (1812433253UL * (mt[mti-1] ^ (mt[mti-1] >> 30)) + mti);}

    // detect computer architecture
    union {double f; uint32 i[2];} convert;
    convert.f = 1.0;
    // Note: Old versions of the Gnu g++ compiler may make an error here,
    // compile with the option -fenum-int-equiv to fix the problem
    if (convert.i[1] == 0x3FF00000) Architecture = LITTLEENDIAN;
    else if (convert.i[0] == 0x3FF00000) Architecture = BIGENDIAN;
    else Architecture = NONIEEE;}

void TRandomMersenne::RandomInitByArray(uint32 seeds[], int length) {
    // seed by more than 32 bits
    int i, j, k;
    RandomInit(19650218UL);
    if (length <= 0) return;
}

```

```

i = 1; j = 0;
k = (MERS_N > length ? MERS_N : length);
for (; k; k--) {
    mt[i] = (mt[i] ^ ((mt[i-1] ^ (mt[i-1] >> 30)) * 1664525UL)) +
seeds[j] + j;
    i++; j++;
    if (i >= MERS_N) {mt[0] = mt[MERS_N-1]; i=1;}
    if (j >= length) j=0;
    for (k = MERS_N-1; k; k--) {
        mt[i] = (mt[i] ^ ((mt[i-1] ^ (mt[i-1] >> 30)) * 1566083941UL)) - i;
        if (++i >= MERS_N) {mt[0] = mt[MERS_N-1]; i=1;}
    mt[0] = 0x80000000UL;}// MSB is 1; assuring non-zero initial array

uint32 TRandomMersenne::BRandom() {
    // generate 32 random bits
    uint32 y;

    if (mti >= MERS_N) {
        // generate MERS_N words at one time
        const uint32 LOWER_MASK = (1LU << MERS_R) - 1; // lower MERS_R bits
        const uint32 UPPER_MASK = -1L << MERS_R;           // upper (32 - MERS_R)
bits
        static const uint32 mag01[2] = {0, MERS_A};

        int kk;
        for (kk=0; kk < MERS_N-MERS_M; kk++) {
            y = (mt[kk] & UPPER_MASK) | (mt[kk+1] & LOWER_MASK);
            mt[kk] = mt[kk+MERS_M] ^ (y >> 1) ^ mag01[y & 1];
        }

        for (; kk < MERS_N-1; kk++) {
            y = (mt[kk] & UPPER_MASK) | (mt[kk+1] & LOWER_MASK);
            mt[kk] = mt[kk+(MERS_M-MERS_N)] ^ (y >> 1) ^ mag01[y & 1];
        }

        y = (mt[MERS_N-1] & UPPER_MASK) | (mt[0] & LOWER_MASK);
        mt[MERS_N-1] = mt[MERS_M-1] ^ (y >> 1) ^ mag01[y & 1];
        mti = 0;
    }

    y = mt[mti++];

    // Tempering (May be omitted):
    y ^= y >> MERS_U;
    y ^= (y << MERS_S) & MERS_B;
    y ^= (y << MERS_T) & MERS_C;
    y ^= y >> MERS_L;
    return y;
}

double TRandomMersenne::Random() {
    // output random float number in the interval 0 <= x < 1
    union {double f; uint32 i[2];} convert;
    uint32 r = BRandom(); // get 32 random bits
}

```

```

// The fastest way to convert random bits to floating point is as
follows:
// Set the binary exponent of a floating point number to 1+bias and set
// the mantissa to random bits. This will give a random number in the
// interval [1,2). Then subtract 1.0 to get a random number in the
interval
// [0,1). This procedure requires that we know how floating point
numbers
// are stored. The storing method is tested in function RandomInit and
saved
// in the variable Architecture. The following switch statement can be
// omitted if the architecture is known. (A PC running Windows or Linux
uses
// LITTLEENDIAN architecture):
switch (Architecture) {
case LITTLEENDIAN:
    convert.i[0] = r << 20;
    convert.i[1] = (r >> 12) | 0x3FF00000;
    return convert.f - 1.0;
case BIGENDIAN:
    convert.i[1] = r << 20;
    convert.i[0] = (r >> 12) | 0x3FF00000;
    return convert.f - 1.0;
case NONIEEE: default:
;}
// This somewhat slower method works for all architectures, including
// non-IEEE floating point representation:
return (double)r * (1.0/((double)(uint32)(-1L)+1.));}

int TRandomMersenne::IRandom(int min, int max) {
// output random integer in the interval min <= x <= max
int r;
r = int((max - min + 1) * Random()) + min; // multiply interval with
random and truncate
if (r > max) r = max;
if (max < min) return 0x80000000;
return r;
}

```