

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

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

par

Élie Béranger LÉBATTO

MODÉLISATION EN 3-D DE L'ACCUMULATION DE GLACE SUR UN CYLINDRE

FIXE PAR LA MÉTHODE DU CHEMINEMENT ALÉATOIRE

Décembre 2004



### **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

Ice accretion on the power network equipment is a real problem for cold regions utilities because of the costs generated by the mechanical damage caused by external icing events and also the costs related to ice accumulations forecasting. The mitigation of these mechanical damage effects requires laboratory investigations as well as a theoretical analysis followed by computer simulations. The purpose of this work is to develop a 3D model of the ice accretion on a fixed cylinder representing transmission line conductor. The developed model predicts the ice accretion shape by considering some simplifying hypotheses. This shape affects the collection efficiency of the freezing rain, which leads to an increase of the gravitational load. It also affects the wind load by considering the impact angle of the droplets. This model emulates the flow of unfrozen water film along the surface of the iced conductor. This is made by the "Random Walk" method which emulates the walk of the liquid particles coming from a discretisation of the unfrozen water film. During their progress, the liquid particles freeze or leave the structure. The freezing probability, shedding parameter and motion parameter are the microscopic parameters of the model. The macroscopic atmospheric conditions that control the icing are the heat transfer to the air stream, the precipitation rate and the impact angle of droplet which depends on the speed and direction. A new idea of this research has been added, an approach to consider the cylinder flexibility has been developed. Relating the microscopic and macroscopic variables is a challenging aspect of this type of modeling. It has many advantages, including the ability to simulate freezing rain ice accretions on objects of highly complex geometry such as insulators.

## RÉSUMÉ

Dans les pays nordiques comme le Canada, les pluies verglaçantes ont des effets nocifs sur les équipements des réseaux électriques. La réduction de ces effets requiert une recherche en laboratoire tout comme une analyse théorique suivie d'une simulation sur ordinateur. C'est dans cette optique que s'inscrit notre travail de recherche dont le but est de développer un modèle en 3-D de l'accumulation de glace sur un cylindre fixe représentant un conducteur de ligne. Ce modèle tente de prédire la forme de l'accumulation, car cette forme affecte le taux de collection des pluies verglaçantes d'où l'augmentation de la charge gravitationnelle. Elle affecte aussi la charge de vent sur le conducteur en considérant l'angle d'impact des gouttelettes. Le modèle émule l'écoulement du film d'eau non gelée à la surface du conducteur givré. Cette émulation se fait par la méthode du «cheminement aléatoire» qui se traduit par un cheminement aléatoire de particules liquides issues d'une discrétisation du film d'eau non gelée. Durant ce cheminement, les particules liquides gèlent ou quittent la structure par délestage. La probabilité de congélation, le paramètre de délestage et les probabilités de mouvement sont les paramètres du modèle. Les conditions atmosphériques macroscopiques qui commandent l'accumulation de glace sont l'échange de chaleur avec l'air, le taux de précipitation, l'inclinaison du conducteur de ligne, et l'angle d'impact des gouttelettes d'eau en surfusion. Une nouvelle approche, qui prend en compte la flexibilité du conducteur a été développée. L'expression des paramètres du modèle en fonction des variables macroscopiques est l'un des points forts de cette méthode. Cependant, elle possède d'autres avantages, à savoir, simuler des caractéristiques réalistes telles la rugosité de l'accumulation, la formation de glaçons.

## REMERCIEMENTS

Ce mémoire de maîtrise a été réalisé dans le cadre de la Chaire industrielle CRSNG/Hydro-Québec/UQAC sur le givrage atmosphérique des équipements des réseaux électriques (CIGELE). Je tiens à remercier particulièrement mon directeur de recherches le Professeur **Masoud Farzaneh**, Titulaire de la CIGELE, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe de chercheurs et pour avoir supervisé mes travaux. Je tiens à lui manifester ma profonde gratitude pour le soutien financier et moral dont j'ai bénéficié de sa part et pour l'opportunité qu'il m'a été donnée de faire cette maîtrise incluant un séjour de 3 mois en Alberta pendant la réalisation de ce travail.

Je témoigne aussi toute ma reconnaissance à mon co-directeur de recherches, le Professeur **Edward P. Lozowski** du Département des sciences de la terre et atmosphériques de l'Université d'Alberta pour son soutien et ses conseils judicieux prodigués.

Je tiens enfin à remercier sincèrement mes frères **Lébatto Achille** et **Lébatto aubin** pour le soutien moral et financier qu'ils m'ont apportés pendant la durée de ma maîtrise. Un grand merci au **Dr. Issouf Fofana** et au **Dr. Benjamin Allou** pour leur soutien moral.

Je n'oublie pas tous les membres de la CIGELE et ceux du Département de météorologie de l'université d'Alberta à qui j'exprime mon infinie gratitude pour leur assistance et conseils.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>CHAPITRE 1</b>	
<b>INTRODUCTION</b>	<b>1</b>
1.1 Le givrage.....	1
1.2 Description générale du processus de givrage.....	2
1.2.1 Le givre.....	2
1.2.2 Le verglas.....	3
1.2.3 La neige mouillée.....	3
1.2.4 La gelée blanche.....	3
1.3 Problématique.....	4
1.4 Objectifs.....	5
1.4.1 Objectif principal.....	5
1.4.2 Objectifs spécifiques.....	5
1.5 Méthodologie.....	6
<b>CHAPITRE 2</b>	
<b>TRAVAUX ANTÉRIEURS SUR LA MODÉLISATION DU GIVRAGE DES</b>	
<b>OBJETS CYLINDRIQUES</b>	<b>7</b>
2.1 Modèles mathématiques.....	7
2.1.1 Le modèle de Jones.....	7
2.1.2 Le modèle de Chaîné et Castonguay.....	10
2.1.3. Le model de McComber.....	11
2.2 Modèles numériques.....	14
2.2.1 Les modèles indépendants du temps.....	16
2.2.2 Les modèles à dépendance temporelle.....	19
2.2.3 Le modèle stochastique de Szilder.....	25
<b>CHAPITRE 3</b>	
<b>DESCRIPTION DU MODÈLE</b>	<b>27</b>
3.1 Modèle numérique.....	27
3.2 Le paramètre de mouvement $P_M$ et la Probabilité de congélation $P_C$ .....	30
3.3 Le paramètre du champ de congélation $n_c$ .....	34
3.4 Le paramètre de délestage $P_D$ .....	35
3.5 L'angle d'impact des gouttelettes $\Phi$ .....	36
3.6 La flexibilité du cylindre.....	39
3.7 Les probabilités de mouvement.....	41
<b>CHAPITRE 4</b>	
<b>RÉSULTATS ET DISCUSSION</b>	<b>46</b>
4.1 Influence du flux de chaleur externe sur l'accrétion de glace.....	46
4.2 Influence du taux de précipitation sur l'accrétion de glace.....	48
4.3 Influence de l'angle d'impact des gouttelettes sur l'accrétion de glace.....	50

4.3.1 Influence du flux de chaleur externe sous une variation de l'angle d'impact des gouttelettes.....	53
4.3.2 Influence du taux de précipitation sous une variation de l'angle d'impact des gouttelettes.....	54
4.4 Influence de la flexibilité du conducteur de ligne sur l'accrétion de glace.....	55
 <b>CHAPITRE 5</b>	
<b>CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS</b>	<b>66</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>70</b>
<b>ANNEXE 1.....</b>	<b>77</b>
<b>ANNEXE 2.....</b>	<b>85</b>
<b>ANNEXE 3.....</b>	<b>93</b>
<b>ANNEXE 4.....</b>	<b>94</b>
<b>ANNEXE 5.....</b>	<b>95</b>

### Listes des abréviations et symboles

- $D$  : Diamètre du dépôt de glace (cm).  
 $D_i$  : Section de l'accumulation (m).  
 $d_m$  : Diamètre du volume médian des gouttelettes (mm).  
 $E$  : Efficacité de la collection.  
 $E_L$  : Teneur en eau liquide ( $\text{kg.m}^{-3}$ ).  
 $f$  : Flèche (m).  
 $F_E$  : Flux total de l'eau ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{hr}^{-1}$ ).  
 $Fr$  : Facteur de rigidité.  
 $I$  : L'intensité du givrage.  
 $Ind$  : variable permettant de contrôler le processus de délestage.  
 $K$  : Facteur de correction de forme.  
 $K_v$  : nombre de cellules vides dans le voisinage de la cellule courante ayant le maximum de voisins.  
 $L$  : Distance à laquelle toute l'eau a gelée (m).  
 $L_f$  : Chaleur latente de fusion de l'eau de  $0^\circ\text{C}$  ( $\text{J.kg}^{-1}$ ).  
 $M$  : Charge de glace ( $\text{kg.m}^{-1}$ ).  
 $m_l$  : Flux massique de tance l ( $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ).  
 $N$  : Durée de la pluie verglaçante (hr).  
 $n$  : Fraction de l'eau gelée.  
 $n_c$  : Paramètre du champ de congélation.  
 $O$  : Point de stagnation.  
 $P$  : Portée (m).  
 $P_{Bh}$  : Probabilité de mouvement vers le bas en considérant l'impact des gouttelettes sur un cylindre parfaitement horizontal.  
 $P_c$  : Probabilité de congélation.  
 $P_D$  : Paramètre de délestage.  
 $P_M$  : Probabilité de mouvement vers le bas dans le modèle 2D de Szilder.  
 $P_{MO}$  : Probabilité de mouvement dans chacune des directions pour une chute de pluie verglaçante verticale sur un cylindre parfaitement horizontal.  
 $P_{XAm}$  : Probabilité de déplacement en amont sur l'axe Z.  
 $P_{XAv}$  : Probabilité de déplacement en aval sur l'axe X.  
 $P_{YB}$  : Probabilité de déplacement vers le bas suivant l'axe Y.  
 $P_{ZD}$  : Probabilité de déplacement vers la droite suivant l'axe Z.  
 $P_{ZG}$  : Probabilité de déplacement vers la gauche suivant l'axe Z.  
 $Q$  : Flux moyen de chaleur externe ( $\text{W.m}^{-2}$ ).  
 $R$  : Rayon du cylindre (m).  
 $R_{eq}$  : Epaisseur radiale équivalente (m).



- $R_{eq}^f$  : Épaisseur radiale équivalente d'un câble flexible (m).  
 $R_{eq}^r$  : Épaisseur radiale équivalente d'un câble rigide (m).  
 $R_{eq}^m$  : Épaisseur radiale équivalente d'un câble de rigidité connue (m).  
 $RND()$  : générateur de nombre aléatoire selon une loi uniforme.  
 $T$  : Tension maximale exercée sur le conducteur de ligne (N).  
 $V_G$  : Vitesse d'impact ( $m.s^{-1}$ ).  
 $V_T$  : Vitesse terminale des gouttelettes d'eau ( $m.s^{-1}$ ).  
 $V_V$  : Vitesse du vent ( $m.s^{-1}$ ).  
 $W$  : Taux de précipitation ( $mm.hr^{-1}$ ).  
 $\beta$  : angle d'inclinaison du câble (degré).  
 $\Delta l$  : Distance du pas à la surface de la structure de glace (m).  
 $\Delta S$  : Distance du pas dans le modèle numérique (m).  
 $\pi$  : Nombre PI.  
 $\rho$  : Densité de la glace accumulée ( $g.cm^{-3}$ ).  
 $\bar{\rho}$  : Densité moyenne du dépôt de glace ( $g.cm^{-3}$ ).  
 $\rho_G$  : Densité de la glace ( $kg.m^{-3}$ ).  
 $\rho_w$  : Masse volumique de l'eau ( $kg.m^{-3}$ ).  
 $\Phi$  : Angle d'impact des gouttelettes d'eau (degré).

## Listes des figures

2.1	Forme de l'accrétion de glace sur un câble rigide, modèle de McComber.....	13
2.2	Formes d'accrétion prévues par le modèle, en fonction de la température ambiante ( $^{\circ}\text{C}$ ), de la vitesse du vent ( $\text{ms}^{-1}$ ), de la teneur en eau liquide des nuages ( $\text{gm}^{-3}$ ) et de la durée du givrage (min).....	18
2.3	Certains résultats du modèle de Makkonen. Vitesse du vent $20 \text{ ms}^{-1}$ , température de l'air $-1^{\circ}\text{C}$ , diamètre du câble $1 \text{ cm}$ , teneur en eau liquide des nuages $0,3 \text{ g.m}^{-3}$ , diamètre du volume médian des gouttelettes $25 \mu\text{m}$	
(a)	Variation de la fraction gelée $n$ et de l'efficacité de la collection en fonction dans le temps.....	21
(b)	Variation de la densité de l'accrétion $\rho$ , de la densité total du dépôt $\bar{\rho}$ , de l'intensité du givrage $I$ .....	22
(c)	Variation de la charge de glace $M$ et du diamètre du dépôt $D$ .....	22
2.4	Variation de la charge de glace $M$ et du diamètre du dépôt de glace $D$ en fonction de la pression. Vitesse du vent $10 \text{ ms}^{-1}$ , température de l'air $-10^{\circ}\text{C}$ , diamètre du câble $3,5 \text{ cm}$ , teneur en eau liquide des nuages $0,3 \text{ gm}^{-3}$ , diamètre du volume médian des gouttelettes $25 \mu\text{m}$ , humidité relative $90\%$ .....	24
2.5	Variation de la charge de glace $M$ et de du diamètre du dépôt de glace $D$ en fonction du diamètre du volume moyen des gouttelettes $d_m$ ( $\mu\text{m}$ ). Les mêmes conditions atmosphériques qu'à la figure 1.4.....	24
3.1	Représentation schématique du domaine en trois dimensions.....	29
3.2	Un cylindre soumis à une pluie verglaçante verticale.....	32
3.3	Schéma de la vitesse des gouttelettes montrant leur angle d'impact.....	39
3.4	Schéma simplifié d'un conducteur de ligne sur le réseau.....	40
3.5	Flexibilité du conducteur de ligne représentée par l'angle $\beta$ .....	41
3.6	Vue de profile du cylindre incliné représentant son angle d'inclinaison .....	43
4.1	Influence du flux de chaleur externe sur la forme de l'accrétion. Taux de précipitation $1 \text{ mmh}^{-1}$ , temps de simulation 5 heures.....	57

4.2 Influence du flux de chaleur externe sur la distribution de la masse. Taux de précipitation $5 \text{ mmh}^{-1}$ , temps de simulation 5 heures.....	58
4.3.a Distribution de la masse de glace en fonction du taux de précipitation.....	59
4.3.b et 4.3.c Section de la structure de glace suivant le plan vertical passant par l'axe du cylindre, pour différentes valeurs du taux de précipitation. Flux de chaleur externe, $30 \text{ W.m}^{-2}$ .....	60
4.4 Influence de l'angle d'impact des gouttelettes d'eau sur la distribution de la masse durant le processus d'accumulation de la glace.....	61
4.5 Forme de l'accumulation de glaces pour différentes valeurs de l'angle d'impact des gouttelettes d'eau. La direction du vent est de la droite vers la gauche perpendiculaire au conducteur. Taux de précipitations $1 \text{ mm.h}^{-1}$ ; temps de simulation 5 heures ; flux de chaleur externe $5 \text{ Wm}^{-2}$ .....	62
4.6 Influence du flux chaleur externe avec une variation de l'angle d'impact des gouttelettes d'eau. La direction du vent est de la droite vers la gauche perpendiculaire au conducteur. Taux de précipitations $5 \text{ mmh}^{-1}$ ; temps de simulation 5heures.....	63
4.7 Influence du taux de précipitations sous l'action du vent. Le sens du vent est de la droite vers la gauche perpendiculaire au conducteur.....	64
4.8 Influence de l'angle d'inclinaison $\beta$ du cylindre sur le processus d'accumulation de glace.	
(a) régime humide.....	65
(b) régime sec. ....	65

## CHAPITRE 1

### INTRODUCTION

#### 1.1 Le givrage

Au Canada comme dans plusieurs pays nordiques, l'accumulation de glace due au givre, au verglas ou à la neige mouillée, combinée au vent, peut parfois causer des dégâts importants sur les équipements des réseaux électriques. Le givrage se produit lorsque la structure ou l'équipement, est soumis à une forte humidité ou à la présence de gouttelettes en surfusion. De telles conditions se retrouvent dans les pluies et bruines verglaçantes, les nuages, les brouillards givrants et la neige mouillée. L'accumulation de glace s'effectue à une température avoisinant la température de solidification de l'eau qui est de 0°C à la pression atmosphérique.

De façon générale, on appelle communément glace atmosphérique un grand nombre de dépôts de natures différentes sur les équipements des réseaux électriques. Il s'agit de verglas, de givre proprement dit, de neige mouillée ou d'une combinaison de ces trois états.

En ce qui concerne les réseaux aériens de transport et de distribution d'énergie électrique, le givrage conduit à la formation d'une gaine de glace autour des câbles et des conducteurs de lignes, ce qui augmente leur poids et peut changer leur dynamique.

## **1.2 Description générale du processus de givrage**

Une description simple de la physique du processus d'accumulation de la glace est utile pour une meilleure compréhension du travail. Dans l'atmosphère, les gouttelettes d'eau à l'état liquide à des températures inférieures de plusieurs dizaines de degrés à 0°C, sont en surfusion. Elles sont dans cet état de surfusion seulement pour des températures allant jusqu'à -40°C. Elles heurtent la surface de l'objet ou de la glace qui recouvre cet objet. Le degré de surfusion influence la forme que prend la gouttelette d'eau en surfusion après son impact. Les gouttelettes d'eau gèlent après leur impact en raison de la surfusion et des dendrites de glace croissent à mesure qu'augmente le degré de surfusion. La solidification s'effectue à un taux déterminé par la quantité de chaleur latente de solidification qui peut être absorbée par la gouttelette elle-même, par l'air et par le substrat. Mais il arrive que cette chaleur latente de solidification soit insuffisante pour solidifier toute l'eau en surfusion avant l'arrivée d'une autre gouttelette au même endroit. Alors il peut se produire deux phénomènes, soit une certaine quantité d'eau liquide reste emprisonnée à l'intérieur de la matrice de glace et forme de la glace spongieuse, soit cette quantité d'eau liquide s'écoule sous l'effet des forces aérodynamiques.

### **1.2.1 Le givre**

La solidification s'effectue à un taux déterminé par la quantité de chaleur latente de solidification et que ce taux est suffisant, toute l'eau liquide de la gouttelette d'eau en surfusion se solidifie avant l'arrivée d'une autre gouttelette au même endroit et la

température finale, à la surface de la glace qui recouvre l'objet, est inférieure à la température de solidification de l'eau.

### **1.2.2 Le verglas**

Il y a du verglas lorsque la chaleur latente de solidification n'est pas suffisante pour permettre à toute l'eau liquide de la gouttelette d'eau en surfusion de se solidifier. Alors, une certaine quantité d'eau peut rester emprisonnée à l'intérieur de la matrice de glace lorsqu'une seconde gouttelette d'eau arrive au même endroit et former de la glace spongieuse ou s'écouler sous l'effet des forces aérodynamiques. Ce phénomène est dû à une pluie en surfusion, communément appelée pluie verglaçante.

### **1.2.3 La neige mouillée**

Lorsque la température de l'air est juste au-dessus de la température de solidification de l'eau, les flocons de neige qui heurtent la surface de l'objet ou de la glace qui le recouvre, s'agglomèrent sous l'effet des forces aérodynamiques, pour former une grande charge de neige. Le degré d'adhésion de la neige dépend des conditions météorologiques. Pour l'instant, la physique du processus d'adhésion de la neige mouillée n'est pas bien comprise.

### **1.2.4 La gelée blanche**

La gelée blanche se forme lorsque la vapeur d'eau contenue dans l'air se sublime sur un substrat dont la température est inférieure à la température de solidification de l'eau. La gelée blanche est un phénomène peu important du givrage.

### 1.3 Problématique

Presque chaque année, il y a des tempêtes de glace au Canada dont l'impact social et économique est souvent désastreux. Il y en a une qui reste encore dans les mémoires, celle de 1998. Elle a occasionné une coupure d'électricité dans plusieurs milliers de foyers au Québec, en Ontario et aux États-unis d'Amérique. La combinaison de vents et de verglas est un élément essentiel des critères de conception pour les structures des réseaux de distribution et de transport d'électricité. En effet, l'accumulation de glace peut entraîner la rupture des équipements du réseau. Cette accumulation de glace sur un conducteur modifie ses caractéristiques aérodynamiques et, dans certains cas, l'instabilité qui en résulte entraîne une oscillation du conducteur à des amplitudes qui peuvent atteindre plusieurs mètres. De tels mouvements affectent le bon fonctionnement des lignes, en causant ainsi certains problèmes tels que: le déclenchement d'arcs électriques qui endommagent les conducteurs et la rupture de conducteurs et d'accessoires de lignes. L'accrétion de glace a donc un impact sur la continuité de service ainsi que sur les coûts d'entretien des lignes. C'est ce qui a amené des chercheurs de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) à se pencher sur la problématique du givrage. Leur effort a reçu un sérieux coup de pouce en 1998 avec la création de la Chaire Industrielle CRSNG/Hydro-Québec/UQAC sur le givrage atmosphérique des équipements des réseaux électriques (CIGELE), puis en janvier 2003, avec l'obtention d'une chaire de recherche du Canada portant sur l'ingénierie du givrage des réseaux électriques, l'INGIVRE. Dans le cadre de ses activités visant à accroître les connaissances sur les processus d'accumulation de glace sur les équipements de réseaux électriques, la CIGELE a entrepris un vaste programme de recherche afin de

réunir plus d'informations sur les effets possibles du givrage pour ainsi favoriser l'émergence de nouvelles compétences dans le domaine de la prévention. Les travaux de modélisation réalisés jusqu'à ce jour, dans le cadre de ce programme, ont permis d'obtenir des résultats en 2D qui s'avèrent très intéressants (22-24). Toutefois, bien que les conducteurs soient axisymétriques, la glace accumulée est en général asymétrique à cause de sa distribution non uniforme. Par conséquent, pour être plus réaliste, la simulation doit être tridimensionnelle. C'est pourquoi l'on se propose, dans le cadre de cette nouvelle étude, de mettre en place un outil numérique permettant de prédire la morphologie en trois dimensions de la glace accumulée autour d'un conducteur de ligne suite à une pluie verglaçante.

## **1.4 Objectifs**

### **1.4.1 Objectif principal**

Il s'agit d'élaborer un modèle numérique capable de simuler, en trois dimensions, l'accumulation de glace formée suite à une pluie verglaçante, sur une surface cylindrique.

### **1.4.2 Objectifs spécifiques**

L'atteinte d'un tel objectif passe par la prise en compte :

- du rayon du conducteur ;
- du flux de chaleur vers l'air ;
- de la probabilité de congélation exprimée en fonction du flux de chaleur externe, du taux de précipitation et du rayon du conducteur ;



- de l'angle et de la vitesse d'impact des gouttelettes d'eau afin de déterminer leur trajectoire ;
- d'une nouvelle approche qui prend en compte la flexibilité du cylindre dans le processus d'accumulation de la glace.

Le modèle numérique développé devra être capable de :

- de calculer la masse de glace accumulée ;
- de calculer le diamètre du bout des glaçons formés ainsi que leur longueur et la distance d'espacement ;
- de représenter les gouttelettes gelées dans un domaine tridimensionnel afin de déterminer la morphologie de la glace accumulée.

### 1.5 Méthodologie

Nous avons utilisé la méthode du « cheminement aléatoire » (Random Walk), compte tenu de sa capacité de simuler les deux régimes d'accumulation. Elle présente aussi d'autres avantages, tels que simuler des caractéristiques réalistes de la glace accumulée, comme la rugosité de sa surface et la formation de glaçons. Le principe général de la méthode du cheminement aléatoire est que le déplacement de chaque gouttelette d'eau en surfusion est pris sur une base individuelle. La probabilité de congélation est exprimée en fonction des conditions atmosphériques. Quant au paramètre de délestage, il reste constant pendant les simulations. Le langage « Compaq Visual Fortran 6.5 » a été utilisé comme environnement de développement, et les résultats sont présentés sous forme de graphiques à l'aide du logiciel « Sigma Plot 8.02 ».

## **CHAPITRE 2**

### **TRAVAUX ANTÉRIEURS SUR LA MODELISATION DU GIVRAGE DES OBJETS CYLINDRIQUES**

Il y a une trentaine d'années une tentative d'estimation de l'accumulation de glace sur les lignes de transport d'énergie fut réalisée à l'aide de données météorologiques (1). Ensuite, différentes approches ont vu le jour, telles que les expériences pratiques en laboratoires, les études théoriques telles la modélisation mathématique et la simulation sur ordinateur. La plupart de ces investigations concernaient l'accumulation de glace sur des formes simples, qui, dans la majorité des cas étaient de forme cylindrique circulaire comme les conducteurs de lignes.

#### **2.1 Modèles mathématiques**

##### **2.1.1 Le modèle de Jones**

Le modèle de Jones qui simule l'accumulation de glace due à une pluie verglaçante a été établi en 1996 (2). Pour commencer, Jones a posé une hypothèse simplificatrice, à savoir, une chute verticale des gouttelettes d'eau qui dénote l'absence de vent. Cette accumulation se fait sur une surface horizontale 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  $\rho_G$ , la densité de cette glace est de  $900 \text{ kg.m}^{-3}$ , 0,01 m de précipitation conduit à une couche uniforme d'une épaisseur de 0,011 m. Ce concept a été étendu aux cylindres. Considérant plusieurs cylindres de diamètres différents, suspendus horizontalement au-dessus du sol, chaque cylindre est soumis à 0,01 m de pluie verglaçante sans vent. Si toute l'eau interceptée gèle pour former une accumulation radiale uniforme, alors ce centimètre de précipitation a été uniformément étalé à la surface des cylindres comme la glace. Parce que le périmètre est plus grand que le diamètre du cylindre d'un facteur  $\pi$ , l'épaisseur radiale uniforme de la glace  $R_{eq}$  sur chaque cylindre est:

$$R_{eq} = \frac{\rho_w}{\rho_G} \frac{1}{\pi} = 0,35.10^{-4} \text{ m} \quad (2.1)$$

Où  $\rho_w$ , la densité de l'eau est égale à  $1000 \text{ kg.m}^{-3}$ . Tant que la glace s'accumule uniformément à la surface du cylindre, la section du cylindre reste circulaire. Donc, 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. En 1949 Best proposa une relation donnant la teneur en eau liquide en fonction du taux de précipitation (3):

$$E_L = 67.10^{-6}.W^{0.846} \quad (2.2)$$

où  $W$ , le taux de précipitation s'exprime en  $\text{mm.hr}^{-1}$  et  $E_L$  la teneur en eau liquide en  $\text{kg.m}^{-3}$ . En supposant que toutes les gouttelettes se déplacent horizontalement à la vitesse du vent, le flux horizontal de l'eau  $V_V E_L$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ) ou  $3600V_V E_L$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{hr}^{-1}$ ) où  $V_V$  est la vitesse du vent exprimée en  $\text{m.s}^{-1}$ : Le flux total de l'eau  $F_E$  est obtenu par conversions en unités adéquates suivies de la somme vectorielle du flux horizontal et du flux vertical  $W\rho_w/1000$  ( $\text{kg.m}^{-2}.\text{hr}^{-1}$ ) de précipitations.

$$F_E = [(0,001.W.\rho_w)^2 + (3600.V_V.E_L)^2]^{1/2} \text{ kg.m}^{-2}.\text{hr}^{-1} \quad (2.3)$$

L'épaisseur radiale uniforme de la glace sur un cylindre circulaire, aussi appelée épaisseur radiale équivalente de glace est donnée par l'équation (2.4):

$$R_{eq} = \frac{N}{\rho_G \pi} \sqrt{(0,001.W.\rho_w)^2 + (3600.V_V.E_L)^2} \text{ m} \quad (2.4)$$

Avec  $N$  la durée de la pluie verglaçante en heure,  $W$  ( $\text{mm.hr}^{-1}$ ) le taux de pluie verglaçante et  $V_V$  ( $\text{m.s}^{-1}$ ) la vitesse du vent.

Durant une tempête, le taux de précipitation et la vitesse du vent varient dans le temps, néanmoins ils sont mesurés à chaque heure dans des stations météorologiques. Ce qui fait que l'équation (2.4) peut s'écrire sous une forme générale.

$$R_{eq} = \frac{1}{\rho_G \pi} \sum_{j=1}^N \sqrt{(0,001.W_j.\rho_w)^2 + (3600.V_{V_j}.E_L)^2} \text{ m} \quad (2.5)$$

Où  $W_j$ ,  $E_{Lj}$  et  $V_{Vj}$  sont respectivement le taux de précipitation moyen, la teneur en eau liquide et la vitesse du vent à la  $j^{\text{ieme}}$  heure durant les  $N$  heures de tempête. Cette équation montre que l'épaisseur radiale uniforme de la glace dans le modèle simple est indépendante du diamètre du cylindre, mais dépend de deux paramètres météorologiques, à savoir, le taux de précipitation et la vitesse du vent. Il faut préciser que ce modèle repose sur trois principales hypothèses qui sont:

- l'efficacité de collision des gouttelettes avec le cylindre qui est de 1. Pour les pluies verglaçantes, le mode de la distribution du diamètre des gouttelettes est autour de 1mm. En d'autres termes pour des tailles de conducteurs et de vitesses de vents typiques, l'efficacité de collision prévue est pratiquement égale à 1.

- Toutes les gouttelettes interceptées par le cylindre gèlent. De ce fait le mode d'accumulation de la glace est un régime sec. 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 déstagement et d'éclaboussure des gouttelettes après leur impact.

- 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.

### **2.1.2 Le modèle de Chaîné et Castonguay**

Chaîné et Castonguay ont développé un des premiers modèles mathématiques pour les conducteurs de lignes de transport d'énergie (4). A la place de l'hypothèse de forme circulaire, ils proposèrent une forme semi elliptique de l'accumulation de glace sur un côté

du conducteur. Ils définirent alors un facteur de correction de forme,  $K$ , qu'ils déterminèrent empiriquement à partir d'expériences dans une soufflerie, concernant le givrage marin, réalisées par Stallabrass et Hearty (5).  $K$  est défini comme le rapport de l'aire de la section réelle de l'accrétion sur celle obtenue en utilisant l'hypothèse de la forme semi elliptique. Puisque le facteur de correction de forme  $K$  est déterminé à partir de données expérimentales pour être fonction du rayon du câble  $R_0$  et de la température de l'air ambiant, les résultats de ce modèle montre une forte dépendance de l'épaisseur radiale équivalente de glace à l'égard du diamètre du câble.

### 2.1.3 Le modèle de McComber

L'hypothèse d'une forme circulaire et cylindrique de l'accumulation de glace suite à une pluie verglaçante est utilisée dans plusieurs modèles. Ce type de forme est observé avec des câbles ou des conducteurs flexibles. Par contre les formes non circulaires sont observées avec les conducteurs plus rigides. Cette hypothèse de forme influence le taux d'accumulation par la section transversale du câble qui intercepte les gouttelettes. Cela prend de l'importance pour une durée de pluie verglaçante assez longue, qui peut conduire à une grande différence dans l'estimation de la charge de glace. Afin d'étudier l'effet de cette hypothèse de forme sur l'accumulation de glace, McComber a présenté en 2000 un modèle basé sur l'hypothèse qu'une forme non circulaire était plus réaliste pour les conducteurs rigides (6).

L'évolution de la forme de l'accrétion dépend de son orientation, influencée par la direction des gouttelettes interceptées. Dépendant de sa flexibilité, le câble givré se tordra

lorsque la forme excentrique de la glace crée une torsion qui conduit à une accumulation de glace de forme circulaire. Il faut préciser qu'une estimation exacte de la flexibilité des conducteurs de ligne directement sur le réseau électrique est presque impossible. Face à cette difficulté, McComber proposa que ce modèle de givrage s'appuie sur une approximation basée sur la combinaison des deux cas extrêmes: un conducteur très flexible et un autre très rigide. Il proposa alors qu'à partir d'un facteur de rigidité, un résultat corrigé du modèle pour un câble de rigidité spécifique pourrait être obtenu.

Considérant un facteur de rigidité,  $f_r$ , se trouvant entre les valeurs 0 et 1. La valeur 1 pour un conducteur rigide et la valeur 0 pour un conducteur flexible. L'épaisseur radiale équivalente  $R_{eq}^m$  pour un câble avec une rigidité connue peut être estimée comme une charge moyenne de l'épaisseur radiale équivalente d'un câble flexible,  $R_{eq}^f$  et de l'épaisseur radiale équivalente d'un câble rigide  $R_{eq}^r$ .

$$R_{eq}^m = f_r R_{eq}^r + (1 - f_r) R_{eq}^f \quad (2.6)$$

Pour les câbles flexibles, McComber utilisa la même approche que dans le modèle de Jones. 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 suggéra une forme simple de l'accrétion de glace, pour les câbles très rigides, décrite à la figure (2.1). Une variation linéaire de l'épaisseur est distribuée sur les trois quarts 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,  $\phi$ .

Donc en absence de vent, il y aurait plus de masse au dessus du conducteur, par contre si le vent est violent, la masse serait ajoutée sur le côté. Cette forme est la base d'un modèle avec câble rigide. Les deux paramètres  $R_1$  et  $R_2$  décrivant la forme sont déterminés à partir de la géométrie de la figure (2.1). L'incrément de volume  $R_{eq}$  est obtenu par le produit de l'équation (2.4), du nombre  $\pi$  et de la section de l'accumulation  $D_i$ .

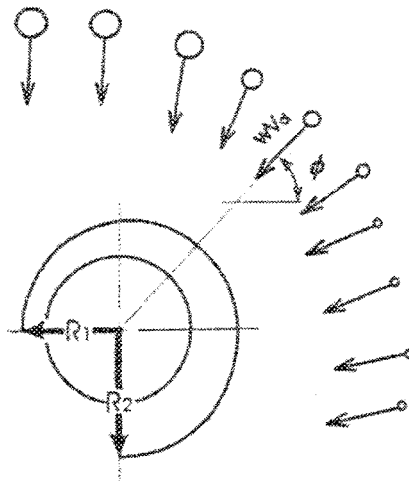


Figure.2.1 Forme de l'accrétion de glace sur un câble rigide, modèle de McComber

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 (2.4) est divisé par 0,75.

Afin d'illustrer l'influence de la forme de glace sur la prédiction de la charge de glace, McComber compara 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. Le modèle avec un conducteur rigide donne une augmentation significative de 27,3% par rapport aux charges maximales de glace avec un conducteur de ligne normal soumis aux forts vents, en comparaison au modèle largement répandu utilisant la forme de glace circulaire.

## 2.2 Modèles numériques

Plusieurs modèles numériques ont été développés pour simuler l'accumulation de glace sur une surface cylindrique sous diverses conditions atmosphériques. L'efficacité de collection des gouttelettes d'eau sur un cylindre a été initialement étudiée par Langmuir et Blodgett en 1945 (7). Un coefficient de collection fut alors introduit pour caractériser l'efficacité de collection d'un profil géométrique donné. Ludlam (1951) démontra l'existence d'un régime sec et d'un régime humide d'accrétion (8). Il définit ces régimes en étudiant l'accrétion de glace sur un cylindre tournant. Il exprima le taux d'accumulation de glace à partir de la teneur en eau liquide, à une température et à une vitesse données, d'un écoulement non perturbé. Il définit la « limite de Ludlam » qui sépare le régime sec et le régime humide. L'accumulation de glace s'effectue en régime sec lorsque la teneur en eau liquide est inférieure à la limite de Ludlam; la température de surface est inférieure à la température de solidification de l'eau. L'accumulation s'effectue en régime humide lorsque la teneur en eau liquide est supérieure à la limite de Ludlam ; la température de la surface est alors égale à la température de solidification de l'eau et le surplus de l'eau est évacué par délestage. En 1952, Fraser, Rush et Braxter montrèrent que dans certaines conditions, l'eau n'est pas totalement évacuée, mais qu'une certaine quantité ou la totalité de l'eau reste emprisonnée dans des poches de la matrice de glace et forme une glace spongieuse

(9). Puis à Messinger, en 1953, de développer une équation de conservation d'énergie pour un état quasi stationnaire sur un cylindre tournant (10). Cette équation devient l'approche thermodynamique traditionnelle pour la modélisation du givrage. Elle fut utilisée en 1979 par Lozowski et al. (11), pour développer un modèle thermodynamique du processus de croissance de la glace sur un cylindre fixe frappé par des gouttelettes d'eau en surfusion. Ce modèle prend en considération l'accumulation mixte, le ruissellement, les termes de transfert de chaleur par diffusion induit par la masse évaporée et sublimée, la chaleur de l'eau accumulée et la température à la surface de la glace et du cylindre, la chaleur latente de solidification, le réchauffement aérodynamique créé par le travail de la compression adiabatique de l'air dans la couche limite et l'énergie cinétique des gouttelettes d'eau en surfusion qui heurtent le cylindre.

Le principal avantage des modèles numériques est leur capacité de prendre en compte les effets temporels, ce qui veut dire la variation des paramètres d'entrée (conditions atmosphériques) dans le temps. En effet, avec ces modèles il n'est pas nécessaire de faire des présuppositions sur le mode d'accumulation ou sur la forme de la glace accumulée.

### **2.2.1 Les modèles indépendants du temps**

Dans ces modèles, la détermination de la forme de glace accumulée repose sur l'hypothèse que le flux initial de l'accumulation reste constant pendant la simulation et que le processus d'accumulation de la glace a lieu en une seule étape sans la prise en compte des interactions entre la glace en formation et le courant d'air.

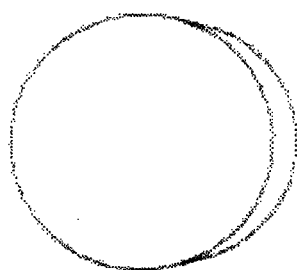
De tels modèles sont appropriés pour une durée de givrage très courte comme le givrage des avions en vol.

En 1983, Lozowski et ses collaborateurs (14) développent un modèle simulant la formation de glace sur un cylindre fixe, qui prend en compte les conditions de givre et de verglas. Le cylindre, de diamètre,  $D$ , est placé dans un courant d'air de vitesse  $U$ . Le courant d'air a une teneur en eau liquide  $E$  et un nuage de gouttelettes d'eau en surfusion. Les gouttelettes sont supposées à la température de l'air et se déplacent 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 localisation à la surface du cylindre. Quant à la deuxième partie, elle traite du bilan thermique en régime établi en fonction de cette localisation afin de déterminer la température locale de surface et le taux initial de l'accumulation de glace. Finalement dans la troisième partie, ce flux d'accumulation de glace est utilisé pour prédire le flux local de croissance pour ainsi déterminer l'épaisseur locale de glace après un temps donné. La représentation graphique de ces épaisseurs sur la circonférence du cylindre, permettra de déterminer la forme de l'accumulation de glace, l'aire de sa section et sa masse. Pour déterminer le taux d'empiètement local des gouttelettes, la partie du cylindre faisant face au vent est divisée en 19 secteurs angulaires de 5 degrés chacun. Le spectre de la taille des gouttelettes d'eau est divisé en 9 catégories de diamètres, de largeur  $5\mu\text{m}$ . Pour chaque section angulaire et chaque catégorie du spectre, l'efficacité de collusion locale est calculée, et l'efficacité de collusion globale pour chaque secteur est la masse moyenne pondérée de

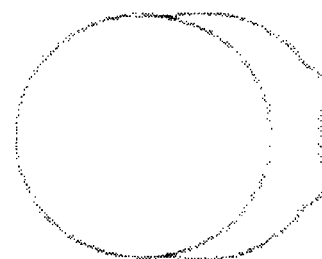
toutes les catégories du spectre. En utilisant cette efficacité de collusion, le flux de masse de l'eau liquide est utilisé pour évaluer les termes de l'équation du bilan thermique en régime établi, qui décrit la thermodynamique de l'accrétion. La fraction gelée peut être obtenue de l'équation du bilan 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 un temps de givrage donné. L'interpolation des points représentant l'épaisseur en fonction de l'angle entraîne une accumulation de la glace possédant une surface lisse. Le code de ce modèle écrit en Fortran 77 par Lozowski et présenté par Chen dans la référence (22) se trouve en annexe 1.

Les morphologies de l'accumulation de glace prédites par le modèle pour certains cas, qui caractérisent une gamme de formes typiques sont présentées à la figure (2.2). Bien que le modèle puisse être appliqué de façon générale, les résultats présentés ici sont applicables aux conditions du givrage des avions en vol.



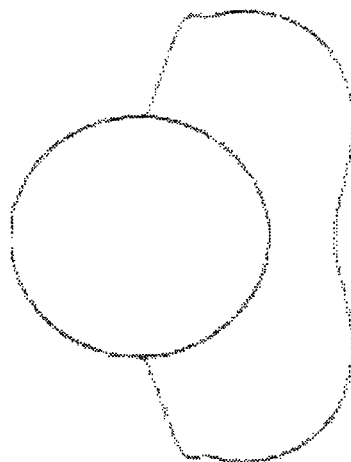
5.0 min; 30.5 ms<sup>-1</sup>

0.4 gm<sup>-3</sup>; -15 °C



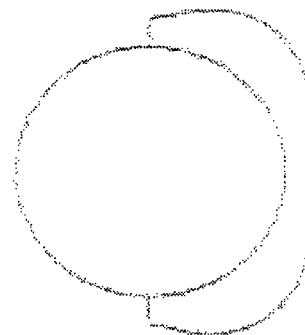
2.5 min; 122 ms<sup>-1</sup>

1.27 gm<sup>-3</sup>; -15 °C



5.0 min; 110 ms<sup>-1</sup>

0.65 gm<sup>-3</sup>; -8 °C



4.0 min; 91.5 ms<sup>-1</sup>

1.17 gm<sup>-3</sup>; -5 °C

Figure.2.2. Formes d'accrétion prévues par le modèle, en fonction de la température ambiante (°C), de la vitesse du vent (ms<sup>-1</sup>), de la teneur en eau liquide des nuages (gm<sup>-3</sup>) et de la durée du givrage (min).

### 2.2.2 Modèles à dépendance temporelle

Ce type de modèles tient compte du fait que le givrage influence l'écoulement de l'air autour de l'objet, les trajectoires des gouttelettes d'eau arrivantes et le transfert thermique (15,16).

En 1984, Makkonen présenta un modèle numérique à dépendance temporelle qui fut particulièrement approprié pour la simulation du givrage des conducteurs de ligne et des câbles (15). Dans ce modèle l'accumulation de glace conserve une forme cylindrique durant le processus de givrage. Le changement du flux de l'accrétion dû à la taille du dépôt de glace et à la densité de glace a été déterminé. Il simule l'accumulation de gouttelettes d'eau en surfusion sur un fil tel qu'un conducteur de ligne. La direction du vent est supposée perpendiculaire au fil. L'accumulation de glace, durant les pluies verglaçantes, combinée à un vent de vitesse très faible et l'accrétion de neige n'ont pas été considérées, parce que la modélisation de l'accumulation de neige mouillée (qui implique une teneur en air de la neige) et l'aérodynamique des flocons de neige ne sont pas bien comprises de nos jours.

Les pluies verglaçantes à faible vitesse de vent peuvent entraîner la formation de glaçons. En 1988 Makkonen développa un modèle issu de son modèle de 1984 qui simule la formation de glaçons (17). Dans ce modèle, le calcul de la masse de glace se fait par étape. A chaque pas de temps, la charge de glace est calculée en fonction de l'intensité du givrage  $I$  (le taux de croissance de la masse de glace est divisé par l'aire de la section du dépôt de glace faisant face au vent), du diamètre du dépôt,  $D$ , de l'efficacité de collection,

$E$ , et de la fraction gelée,  $n$ . La densité de la glace accumulée,  $\rho$  et la densité moyenne du dépôt de glace total  $\bar{\rho}$  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 de glace a été considéré. L'intensité du givrage,  $I$ , est le produit de l'efficacité de collection  $E$ , de la fraction gelée  $n$ , de la vitesse de vent  $V$  et de la teneur en eau liquide de l'air. L'efficacité de collection,  $E$ , est calculée à partir du diamètre du volume médian des gouttelettes. La fraction gelée  $n$ , est calculée à partir du bilan thermique à la surface de la glace accumulée. La charge de glace  $M$ , est calculée en fonction de l'intensité du givrage et du diamètre du dépôt de glace à la fin du pas de temps précédent. La densité de la glace accumulée  $\rho$  est aussi calculée à partir du diamètre du volume médian des gouttelettes, de la température moyenne de surface du dépôt de glace et de la vitesse d'impact des gouttelettes dans la région de stagnation. A partir de la charge de glace et de la densité de la glace accumulée, un nouveau diamètre du dépôt de glace,  $D$ , est calculé à chaque pas de temps. La densité moyenne du dépôt de glace total  $\bar{\rho}$  pour chaque pas de temps, est obtenue à partir de la charge de glace et du diamètre du dépôt de glace. Les sorties pour un pas de temps particulier sont les paramètres d'entrées pour le prochain pas de temps. Le code écrit en Fortran 77 par Makkonen (15) est présenté en annexe 2. Les résultats des simulations de ce code effectuées par Chen dans la référence (22) sont représentés aux figures 2.3a, 2.3b et 2.3c. Ces résultats ont été réalisés avec des paramètres d'entrées caractérisant des conditions de givrage atmosphériques sévères. Les graphiques montrent une augmentation du flux d'augmentation de la charge de glace suivie d'une diminution de ce flux en fonction

du temps dans le régime sec. 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 processus de givrage.

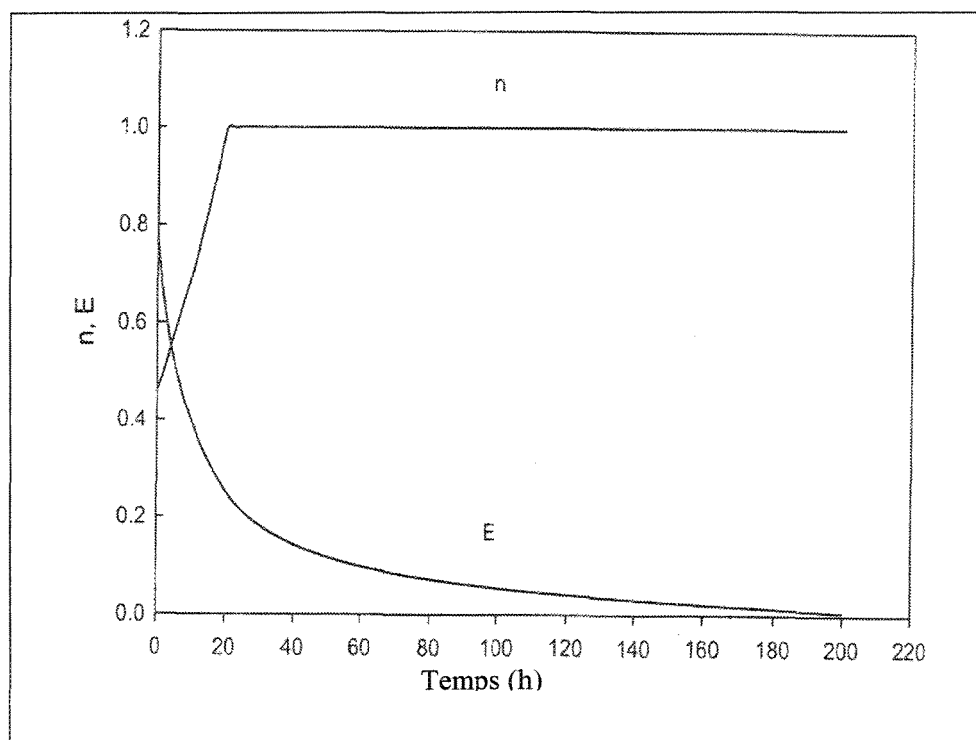


Figure.2.3.a\*

(\*) Variation de la fraction gelée  $n$  et de l'efficacité de la collection en fonction du temps.



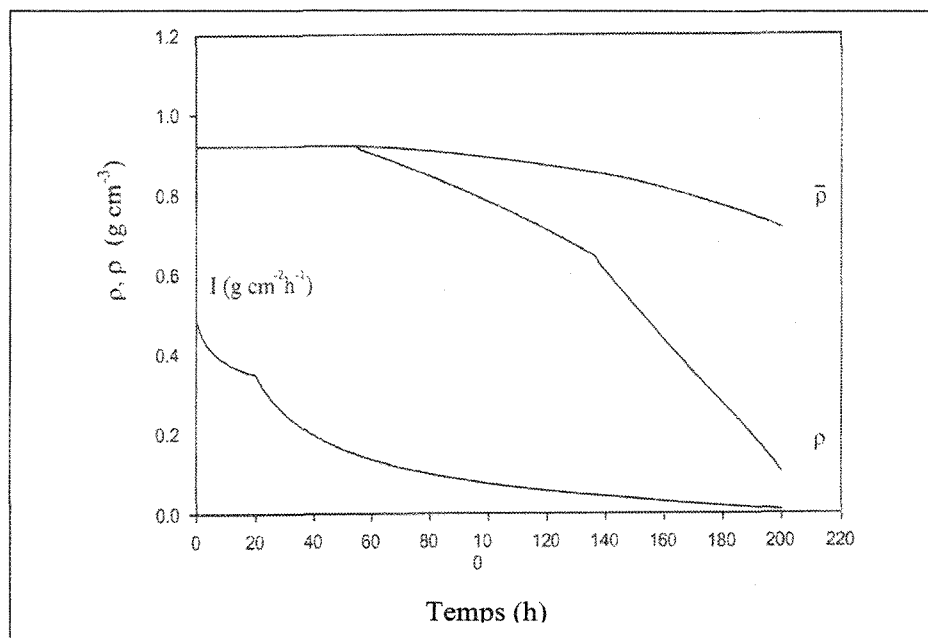


Figure.2.3.b\*\*

(\*\*) Variation de, la densité de l'accrétion  $\rho$ , la densité total du dépôt  $\bar{\rho}$ , de l'intensité du givrage  $I$ .

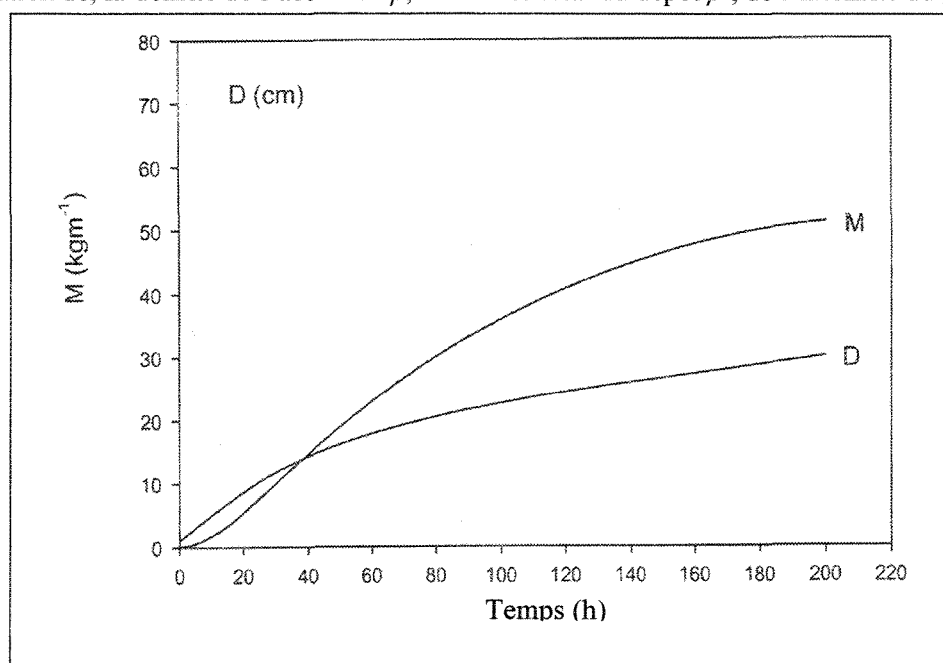


FIG.2.3.c\*\*\*

(\*\*\*) Variation de la charge de glace  $M$  et du diamètre du dépôt  $D$

Figure.2.3. Certains résultats du modèle de Makkonen. Vitesse du vent  $20 \text{ ms}^{-1}$ , température de l'air  $-1^\circ \text{C}$ , diamètre du câble  $1 \text{ cm}$ , teneur en eau liquide des nuages  $0,3 \text{ gm}^{-3}$ , diamètre du volume médian des gouttelettes  $25 \mu\text{m}$ .

Dans ce modèle, Makkonen montra aussi qu'une diminution de la température de l'air ambiant pouvait entraîner soit une augmentation, soit une diminution de la charge de glace dépendamment des autres paramètres atmosphériques et de la durée du givrage. La pression atmosphérique est inversement proportionnelle à l'altitude du site de l'accrétion, de ce fait il devient un paramètre important dans la prévision de l'accrétion parce que les conducteurs de ligne de transports d'énergie sont en altitude. La figure (2.4) montre 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 respectivement de 13% et 2%. Cela s'explique par le fait que dans ce modèle de Makkonen, l'efficacité de la collection est proportionnelle à la pression atmosphérique. Aussi nous avons une diminution plus lente de la densité du dépôt de glace lorsque le régime d'accumulation passe du régime humide au régime sec à faible pression atmosphérique. Par conséquent la charge de glace décroît plus rapidement alors le diamètre du dépôt de glace baisse comme la pression atmosphérique.

La figure (2.5) montre une croissance monotone de la charge de glace avec une augmentation du diamètre de volume médian. Cependant le diamètre du dépôt de glace culmine près d'un diamètre de volume médian d'environ  $25\mu m$ . Ce comportement est lié à la durée du givrage. Lorsque la durée du givrage est courte, le diamètre du dépôt de glace atteint son pic à une valeur plus petite. Lorsque la durée est assez grande (environ 168 heures ou plus), le pic disparaît, et la courbe du diamètre du dépôt de glace croît de façon monotone.

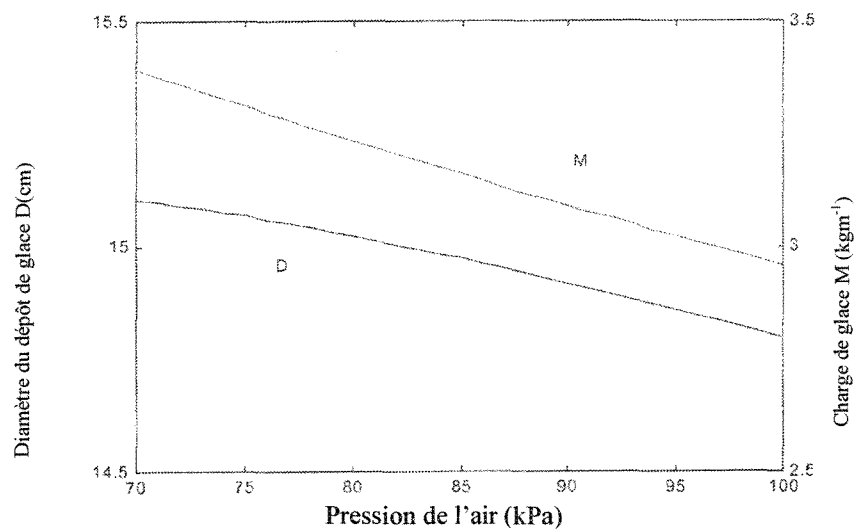


Figure 2.4. Variation de la charge de glace  $M$  et du diamètre du dépôt de glace  $D$  en fonction de la pression. Vitesse du vent  $10 \text{ ms}^{-1}$ , température de l'air  $-10^\circ\text{C}$ , diamètre du câble  $3,5 \text{ cm}$ , teneur en eau liquide des nuages  $0,3 \text{ gm}^{-3}$ , diamètre du volume médian des gouttelettes  $25 \mu\text{m}$ , humidité relative 90%.

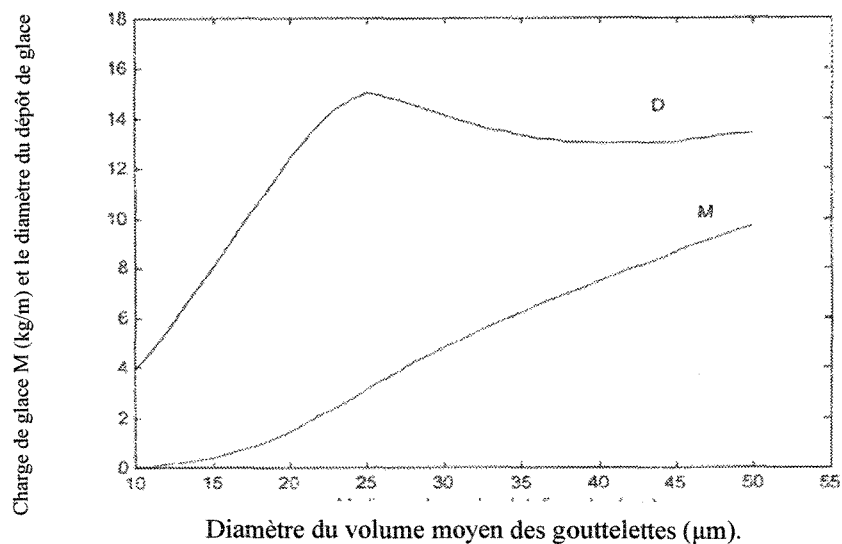


Figure.2.5. Variation de la charge de glace  $M$  et de du diamètre du dépôt de glace  $D$  en fonction du diamètre du volume moyen des gouttelettes  $d_m$  ( $\mu\text{m}$ ). Les mêmes conditions atmosphériques qu'à la figure 2.4.

### 2.2.3 Le modèle stochastique de Szilder

Malgré leur amélioration, les modèles continus classiques d'accumulation de glace ne peuvent pas simuler la complexité de la structure et la forme de la glace lorsque l'accumulation de celle-ci est importante en régime humide. A la place, ils supposent soit une forme simple (15), ou essaient de prédire des formes de glace de complexité prédéterminée (14). La complexité de la forme de glace accumulée a certains effets physiques qui accroissent la charge de glace en présence de vent. Cette géométrie complexe varie dans le temps durant l'accrétion en régime très humide.

A partir d'une idée développée par Lozowski et al. (1983), Szilder introduisit en 1993, la méthode du « cheminement aléatoire » dans la recherche sur le givrage, permettant ainsi une simulation aisée de l'accrétion en régime humide (18). L'eau liquide s'écoule à la surface de l'objet ou de la glace qui le recouvre avant de geler. Le modèle du « cheminement aléatoire » est aussi appelé modèle morphogénétique parce qu'il prédit la forme de l'accrétion. Ce modèle émule le cheminement aléatoire de particules liquides, issues d'une discrétisation du film d'eau non gelée, sur l'objet ou sur la glace qui le recouvre. Les particules finissent leur cheminement aléatoire par congélation ou par arrachement. Les paramètres contrôlant ce cheminement sont la probabilité de congélation et le paramètre de délestage.

A l'aide de cette nouvelle méthode, Szilder développa en 1994 un modèle en 2D de l'accumulation de glace sur un cylindre fixe (19). Puis en 1995, Lozowski et lui font l'ébauche d'un modèle en 3D pour des objets de géométrie complexe (21). Dans le cadre

des projets de la CIGELE (Chaire Industrielle sur le Givrage Atmosphérique des Équipements des Réseaux Électriques) en collaboration avec l'Université de l'Alberta, ce même modèle a été amélioré et appliqué au givrage des câbles et conducteurs aériens (23) et en 2001, Chen a présenté un mémoire de maîtrise à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) (22), dans lequel l'angle d'impact des gouttelettes d'eau a été introduit dans le modèle en 2D du cheminement aléatoire.

## **CHAPITRE 3**

### **DESCRIPTION DU MODELE**

#### **3.1 Modèle numérique**

Le comportement de l'eau coulant à la surface du conducteur de ligne ou de la glace qui le recouvre n'est pas nécessairement un processus continu. Fréquemment les gouttelettes d'eau suivent des rainures courbées par les rugosités à la surface de la glace. Dans notre travail de recherche, ce comportement a été modélisé par la méthode du « cheminement aléatoire ». Ce modèle a pour but de simuler l'accumulation de glace due aux pluies verglaçantes sur un cylindre fixe représentant un conducteur de ligne nommé BERSIMIS de 35mm de diamètre, faisant partie de l'ensemble des principaux conducteurs utilisés par Hydro-Québec présenté en annexe 3. Le flux massique de l'eau est discrétisé en particules liquides de  $1 \text{ mm}^3$  de volume. Ces particules liquides heurtent le cylindre ou la glace qui le recouvre puis se déplacent de façon aléatoire sur leur surface. Dans leur cheminement aléatoire les particules liquides ont deux issues, soit geler soit quitter la structure de glace par arrachement. Ils gardent leur "identité" jusqu'à la fin de leur parcours aléatoire. Il faut aussi noter que les cheminements des particules liquides est séquentiel, c'est-à-dire qu'une particule termine son cheminement avant qu'une autre ne soit libérée. Après son impact, et à chaque étape, un nombre aléatoire compris entre 0 et 1 est généré

par une loi de distribution uniforme qui va déterminer son prochain mouvement, selon une distribution prédéterminée des probabilités de mouvements et de congélation.

La particule liquide peut seulement se déplacer dans une cellule vide adjacente qui a au moins un voisin. Un voisin est défini comme un élément de glace ou de cylindre qui est localisé dans l'une des 26 cellules voisines. Il est interdit qu'elle se déplace dans une cellule déjà occupée. Si le nombre aléatoire généré indique un déplacement dans une cellule vide n'ayant pas de voisin, la particule liquide reste temporairement dans sa cellule courante, et un nouveau nombre aléatoire est généré pour déterminer son prochain mouvement. Cette condition empêche la particule liquide de s'éloigner de la surface de glace. La glace est définie comme l'ensemble des cellules contenant des particules liquides gelées.

Le modèle possède quatre paramètres qui sont : le paramètre de mouvement (qui détermine la relation entre les probabilités de mouvement), la probabilité de congélation (qui détermine la probabilité de congélation à n'importe quel emplacement du domaine), le paramètre de déstassement (qui détermine le nombre de pas de temps permis pour qu'une particule liquide non gelée reste à une extrémité de l'accumulation avant son égouttement) et le paramètre du champ de congélation (qui fournit la taille du sous domaine dans lequel l'emplacement final de la particule liquide sera recherché suite à une décision de congélation). Ces quatre paramètres feront l'objet de discussion dans les sections suivantes.

Le cheminement aléatoire d'une particule liquide est une série de mouvements à l'intérieur du domaine. Le domaine de simulation a une largeur de 150 mm, une longueur

de 200 mm et une hauteur de 200 mm. Il est discrétisé en cellules cubiques de 1 mm de côté, c'est-à-dire un total de 6 000 000 de cellules. Une représentation schématique du domaine est illustrée à la figure (3.1). La particule liquide possède sept alternatives dans son cheminement. Elle peut, soit se déplacer d'une cellule dans chacune des cinq directions perpendiculaires, excepté le haut, soit geler ou quitter la structure de glace par délestage.

Le code du modèle qui compte 625 lignes a été écrit en FORTRAN. Les détails de l'algorithme sont présentés dans le diagramme en annexe 4.

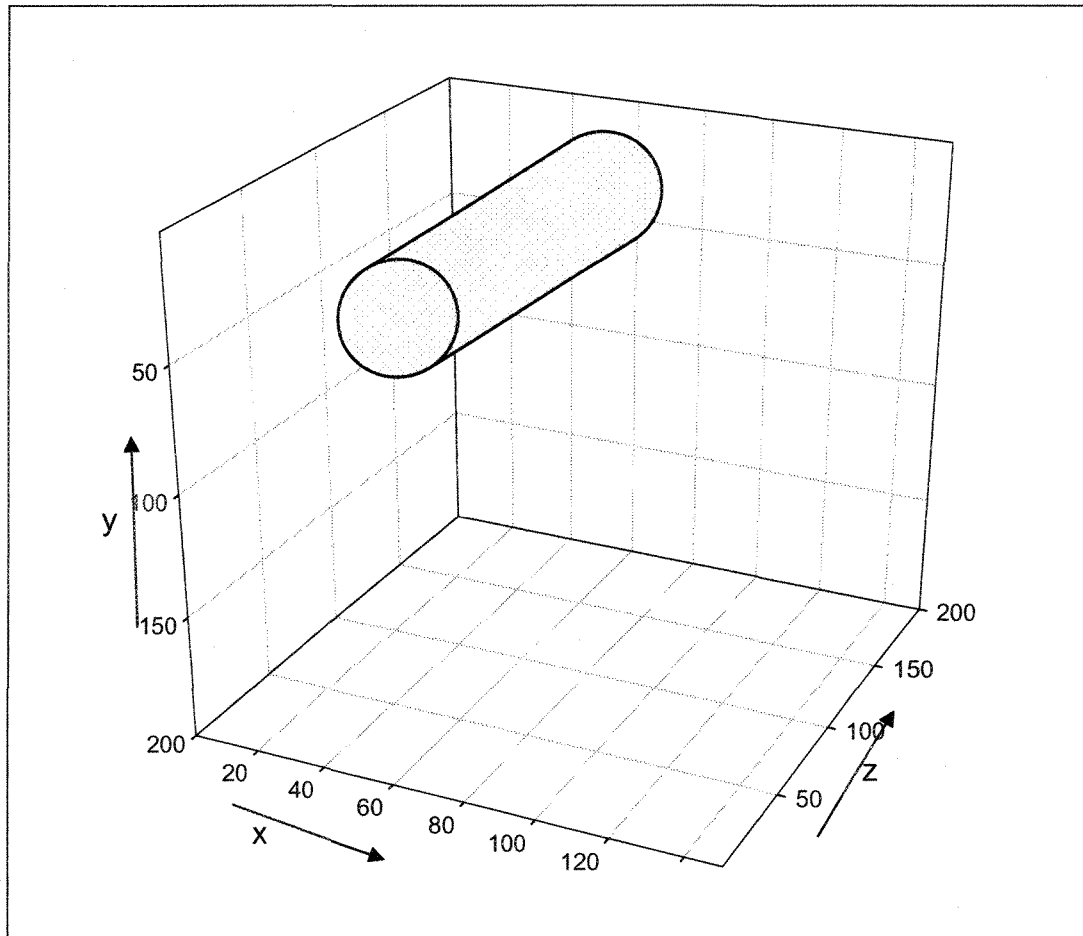


Figure.3.1 Représentation schématique du domaine en trois dimensions, l'unité est le millimètre (mm)



### 3.2 Le paramètre de mouvement $P_M$ et la probabilité de congélation $P_C$

Dans ce modèle nous nous sommes basés sur l'équation (3.1) de Szilder (19) qui établit la relation entre le paramètre de mouvement et la probabilité de congélation. Il faut noter que cette relation a été dans établi dans un modèle 2D. Dans ce modèle, nous considérerons la même approche impliquant la même probabilité de congélation sur toute la longueur du cylindre. Cette hypothèse nous permettra dans un premier temps de simplifier le modèle. La probabilité de congélation peut être exprimée comme suit (19, 22, 23):

$$P_C = \frac{\Delta l}{0.5L} P_M \quad \text{avec} \quad P_C \leq 1 \quad (3.1)$$

Avec  $\Delta l$  : la distance du pas à la surface de la structure de glace (m) ;  $L$  : la distance à laquelle toute l'eau a gelé (m) ;  $P_M$ : le paramètre de mouvement qui définit la probabilité de se déplacer vers le bas.

L'équation (3.1) peut être compréhensible en considérant un cas simple dans lequel les gouttelettes d'eau se déplacent d'une cellule vers le bas selon la verticale à chaque étape de temps. Dans ce cas  $P_M$  est mis à 1. Dès lors la probabilité de congélation est le rapport de la distance parcourue en une étape de temps sur la distance moyenne parcourue par la gouttelette avant sa congélation, c'est-à-dire la moitié de la distance requise pour que toute l'eau gèle. En considérant le mouvement des gouttelettes sur une surface cylindrique, deux aspects compliquent davantage ce cas simple. D'une part, les particules liquides ne se déplacent pas le long de la surface cylindrique dans seulement une direction à chaque étape de temps, et d'autre part la distance du pas tangent à la surface cylindrique est différente du

pas dans le domaine numérique. Afin d'estimer le paramètre de mouvement qui est la probabilité de se déplacer vers le bas à la surface du cylindre, Chen (22) effectua une série de 1000 simulations numériques, dans lesquelles la probabilité de congélation a été mise à zéro, alors les probabilités de déplacements vers la gauche, la droite et vers le bas sont identiques et égales à 0,333. La gouttelette est libérée au-dessus du cylindre dont le rayon est 17,5 fois la taille d'une cellule du domaine. Le nombre d'étape de temps moyen pour atteindre le bas du cylindre était de 373, en raison du mouvement horizontal. Le nombre de pas sur la même distance verticale était de 72. Par conséquent le paramètre de mouvement qui est la probabilité de mouvement vers le bas le long de la surface cylindrique, est de 0,193<sup>1</sup>.

Puisque la gouttelette d'eau se déplace horizontalement ou verticalement par étape, elle doit parcourir une distance totale de  $4R$  ( $R$  : rayon du cylindre) pour faire la moitié de la circonférence du cylindre, à savoir  $\pi R$ . Afin que cela se fasse avec le même nombre d'étapes de temps, nous avons (19, 22, 23),

$$\frac{4R}{\Delta S} = \frac{\pi R}{\Delta l} \quad \Delta l = \frac{\pi}{4} \Delta S \quad (3.2)$$

---

<sup>1</sup> La valeur de 0,193 est la probabilité effective de mouvement vers le bas dans le modèle numérique de Chen (22). Le rapport de cette probabilité effective de mouvement vers le bas sur la probabilité réelle de mouvement en bas est 0,193/0,333 ou 0,580. Nous pouvons l'évaluer analytiquement comme étant simplement le rapport de la distance parcourue jusqu'en bas ( $2R$ ) sur la distance totale parcourue ( $\pi R$ ) qui est 0,637. Le nombre de Chen est plus petit parce que l'estimation analytique ne tient pas compte du retard dans le cheminement de la particule, qui est contrainte de ne pas quitter la surface, lui permettant ainsi de se déplacer vers la gauche.

Avec  $\Delta l$ , la distance du pas à la surface de la structure de glace ;  $\Delta S$  la distance du pas dans le modèle numérique.

Dans un souci de simplification, posons que les gouttelettes d'eau en surfusion tombent verticalement, c'est-à-dire sans prise en compte du vent ; une représentation schématique est donnée à la figure (3.2). Elles suivent une trajectoire parfaitement droite et verticale, heurtant la surface du conducteur sans éclaboussure. Ensuite elles gèlent ou ruissellent à la surface de la structure de glace à cause de la force de gravité terrestre. Nous ignorons l'effet du vent à la surface du film d'eau.

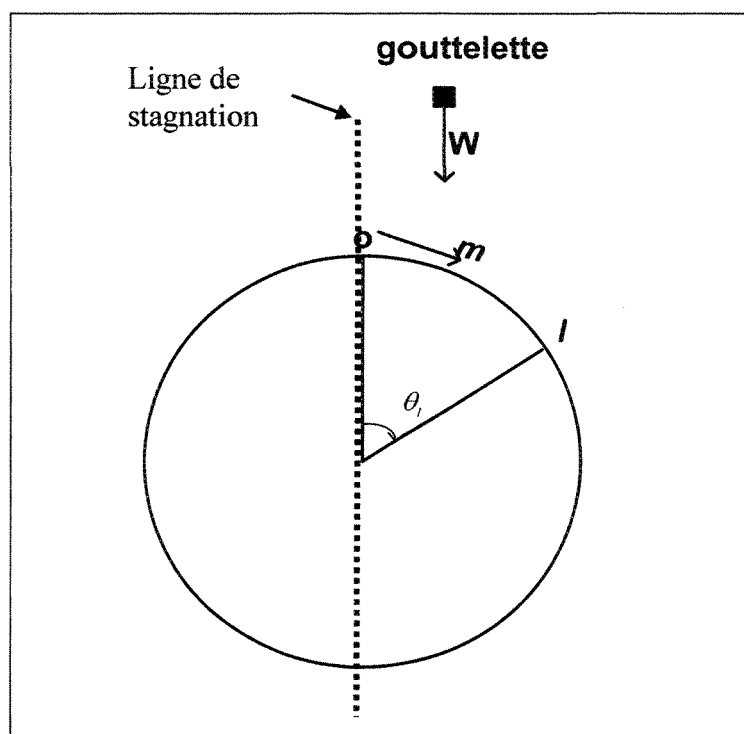


Figure.3.2 Un cylindre soumis à une pluie verglaçante verticale (19).

La distance à laquelle tout le film d'eau gèle peut être déterminée par une équation de bilan énergétique (19, 23). La perte de chaleur vers l'air est proportionnelle à la quantité d'eau gelée.

$$Ql = (W \rho_E R \sin \theta_i - m_i) L_f \quad (3.3)$$

Avec  $Q$ , le flux moyen de chaleur externe du point de stagnation supérieur  $O$  jusqu'au point distant de  $l$ , à la surface de la structure de glace ( $W.m^{-2}$ ). Pour simplifier le modèle, nous avons supposé que ce flux de chaleur est homogène à la surface de la structure de glace, d'où  $Q = \text{constante}$ ;  $l$  la distance à la surface de la structure de glace mesurée à partir du point de stagnation supérieur  $O$ ;  $W$ , le taux de précipitation ( $m.s^{-1}$ );  $\rho_E$ , la masse volumique de l'eau ( $kg.m^{-3}$ );  $R$ , le rayon du cylindre ( $m$ );  $m_i$ , le flux massique de l'eau à la distance  $l$  ( $kg.m^{-1}.s^{-1}$ );  $L_f$ : la chaleur latente de fusion de l'eau à  $0^\circ C$  ( $J.kg^{-1}$ ).

L'équation (3.3) prend une forme simple lorsque l'endroit où toute l'eau a gelé est pris en compte. Si  $l = L$ , alors  $m_i = 0$ . D'où,

$$L = \frac{W \rho_E R \sin \theta_i L_f}{Q} \quad (3.4)$$

En utilisant les équations (3.1), (3.2) et (3.4) la probabilité de congélation peut s'exprimer comme suit :

$$P_c = \frac{\pi}{2} \frac{Q \Delta S}{W \rho_E L_f R \sin \theta_i} P_M \quad (3.5)$$

Considérant que la pluie verglaçante tombe verticalement, la quantité  $W \rho_E R$  est le flux massique total intercepté par le cylindre parce que  $\theta_i = \frac{\pi}{2}$  (19, 23). Donc l'équation (3.5) prend la forme suivante :

$$P_c = \frac{\pi}{2} \frac{Q \Delta S}{W \rho_E L_F R} P_M \quad (3.6)$$

Nous pouvons dire à partir de l'équation (3.6), que la probabilité de congélation est exprimée en fonction du flux de chaleur externe qui dépend fortement de la température ambiante et du courant parcourant le conducteur. Par soucis de simplification, la distribution de ce flux de chaleur externe en fonction de la température ambiante et du courant parcourant le conducteur n'a pas été considérée. La probabilité de congélation dépend aussi du taux de précipitation et du quotient de la distance du pas dans le domaine numérique sur le rayon du cylindre. Nous pouvons dire que la probabilité de congélation est fonction des conditions atmosphériques et du rayon du cylindre. Il faut noter que durant le processus de givrage, la structure soumise au givrage ne demeure pas parfaitement cylindrique. Pour être rigoureux la valeur de  $R$  dans l'équation (3.6) devrait varier pendant la simulation. Néanmoins, dans notre travail,  $R$  reste constant, mais seulement dans le but de calculer la probabilité de congélation.

### 3.3 Le paramètre du champ de congélation $n_c$

Lorsque le nombre aléatoire généré est inférieur à la probabilité de congélation, nous recherchons une cellule dans le voisinage immédiat de la cellule courante de la

particule liquide afin de réduire la porosité de la glace accumulée. Le voisinage est défini par le paramètre du champ de congélation,  $n_c$ . Ici le voisinage correspond à un cube de côtés  $2n_c+1$  cellules, centré sur la cellule courante. Alors l'élément liquide gelé est placé dans une cellule vide, ayant le maximum de voisins (cellules adjacentes occupées par une particule liquide gelée). S'il existe plus d'une cellule correspondant à ce critère, la cellule vide qui recevra la particule liquide gelée, est choisie aléatoirement parmi elles. Cette technique simule qualitativement l'effet des forces de la tension de surface de l'eau qui tendent à représenter une cohésion entre les molécules. Ce paramètre contrôle la porosité de la glace accumulée d'après les résultats présentés dans les références (18-20, 23, 30). Lorsque ce paramètre est zéro (il n'existe pas de voisinage), un givre irréaliste très poreux est obtenu (23, 30). Si le paramètre est égal à 1, une glace compacte est obtenue (23, 30). Pour des valeurs plus grandes, la surface de l'accumulation de la glace devient lisse (30). Par conséquent, nous avons considéré dans la suite du travail que le paramètre du champ de congélation est égal à 2. Cette valeur donne une bonne correspondance de la porosité observée dans un modèle en 3D (30).

### 3.4 Le paramètre de délestage $P_D$

La seconde issue du cheminement aléatoire d'une particule liquide est qu'elle quitte la structure de glace (cylindre + glace) par arrachement. Lorsqu'une particule liquide se déplace le long de la surface de la structure de glace sans geler, elle atteint par la suite une des extrémités de celle-ci. Si elle reste à cet endroit sans geler pendant un nombre d'étapes temporelles spécifié par le paramètre de délestage, elle s'égoutte et quitte la structure de

glace. Autrement dit, ce paramètre détermine le nombre d'étapes de temps permis pour qu'une particule liquide non gelée reste à une extrémité de l'accumulation de glace avant son égouttement. Ce paramètre émule le comportement de la masse d'eau pendante sous le cylindre. Cette masse se forme au niveau le plus bas de la structure de la glace. Dans certains modèles 2D antérieurs le paramètre de délestage a été exprimé en fonction de certaines conditions atmosphériques macroscopiques (taux de précipitation, flux de chaleur externe) et du rayon du cylindre comme indiqué dans les références (19, 21-24). Dans ces travaux, le rayon du cylindre reste constant, mais les conditions atmosphériques macroscopiques influencent le paramètre de délestage. Mais dans les modèles en 3D ce paramètre est constant par manque d'une analyse plus complète (30). Dans le souci de simplifier notre modèle nous l'avons également fixé à une valeur constante. Nous l'avons estimé à 500. Cette valeur a été obtenue comme valeur moyenne du paramètre de délestage dans les références (19, 21-24) en faisant varier les conditions atmosphériques macroscopiques. La valeur 1 000 utilisée comme paramètre de délestage dans le modèle en 3D de la référence (30) qui simule seulement la formation de glaçons s'est avérée trop élevée parce que pour des conditions atmosphériques macroscopiques (flux de chaleur externe, taux de précipitation) réalistes toutes les gouttelettes interceptées sont incorporées à la structure de glace existante.

### 3.5 L'angle d'impact des gouttelettes $\Phi$

Dans notre modèle, nous avons inclut l'effet de l'angle d'impact des gouttelettes. Cette approche a été incorporée pour la première fois dans la méthode du cheminement

aléatoire par Chen (22). Nous développons cette approche un peu loin dans cette section. C'est un aspect très important car les pluies verglaçantes sont parfois accompagnées de vents. Ces vents influencent le transfert thermique à la surface de la structure de glace et leur vitesse varie dans le temps. Dans ce modèle les variations de la vitesse et la direction du vent, pendant le processus de givrage, n'ont pas été prises en compte. Hormis son effet sur le transfert de chaleur à la surface de la structure de glace, le vent peut influencer aussi la trajectoire des gouttelettes d'eau en surfusion, avant et après leur impact. L'action du vent a été incorporée afin de déterminer son influence sur le processus d'accumulation de la glace. Cela s'est traduit par l'influence de l'angle d'impact  $\phi$  des gouttelettes d'eau. Dans ce modèle l'effet des variations du vent sur les variations du transfert thermique n'a pas été considéré. Nous avons défini un modèle balistique afin de déterminer l'angle d'impact des gouttelettes. Chaque gouttelette en surfusion suit une ligne droite oblique qui fait le même angle avec la verticale. Les gouttelettes sont tirées d'une position aléatoire de la partie supérieure horizontale du domaine. Leur trajectoire est issue de simples équations géométriques appropriées. Une approche simple a été utilisée pour trouver l'angle d'impact d'une gouttelette "représentative". Il est utile de noter que, dans un souci de simplification, nous n'avons pas émulé tous les détails de l'empiètement des gouttelettes parce que, dans la nature, pour une vitesse de vent donnée, des gouttelettes de tailles différentes n'ont pas la même trajectoire. Aussi pour différentes tailles de gouttelettes d'eau on aurait une différence significative des sections transversales de l'accrétion de glace (37). Nous avons supposé que toutes les gouttelettes avaient la même taille et avaient le même angle d'impact. Cette taille est définie par le diamètre du volume médian. Bien que cela puisse



être discuté, nous devrions plutôt prendre le diamètre du flux médian. L'éclaboussure des gouttelettes à l'impact a été également ignorée.

Une équation empirique proposée par Atlas et al. (22), basée sur des données obtenues en 1945 par Gunn et Kinzer (24), a été utilisée pour déterminer la vitesse terminale des gouttelettes.

$$V_T = 9.65 - 10.3e^{-0.6d_m} \quad (3.7)$$

Avec  $V_T(\text{m.s}^{-1})$ , la vitesse terminale des gouttelettes ;  $d_m(\text{mm})$ , le diamètre du volume médian. Le diamètre du volume médian est utilisé pour caractériser la taille des gouttelettes d'eau en fonction du taux de précipitation,  $W (\text{mm.h}^{-1})$ :

$$d_m = W^{0.23} \quad (3.8)$$

L'équation (3.8) est une représentation acceptable du spectre de la taille moyenne des gouttelettes pour une pluie presque régulière et continue produite par le procédé de Wegener-Bergeron dont le mécanisme physique présenté par Bergeron (1935) dans la référence (39) était juste une idée exprimée plutôt par Wegener (1911) dans la référence (40). Cette description correspond à une tempête de verglas (22). La figure (3.3) est une représentation schématique de la vitesse et de l'angle d'impact des gouttelettes.

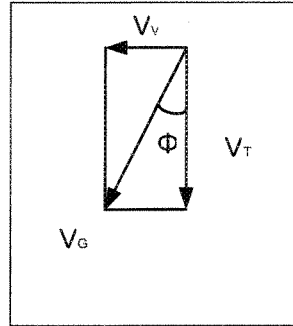


Figure.3.3 Schéma de la vitesse des gouttelettes montrant leur angle d'impact

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{V_v}{V_T} \right) \quad (3.9)$$

Avec  $V_v$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) la vitesse du vent ;  $V_G$  ( $\text{m s}^{-1}$ ), la vitesse d'impact ;  $\phi$ , l'angle d'impact des gouttelettes. L'influence de l'angle d'impact des gouttelettes d'eau sur le processus d'accumulation de la glace a été incorporée au modèle, les détails sont donnés à la section 3.7.

### 3.6 La flexibilité du cylindre.

En réalité, les conducteurs des lignes électriques ne sont pas parfaitement horizontaux, à cause de la gravité et de la flexibilité des fils qui les composent. De ce fait, cette flexibilité des conducteurs de lignes sera prise en compte dans notre modèle, afin de voir comment elle peut affecter le processus d'accumulation de la glace. En incorporant l'effet de la flexibilité du cylindre dans le processus d'accumulation de glace nous réalisons ainsi le premier modèle utilisant la méthode du cheminement aléatoire qui en tient compte. Nous pouvons voir à la figure (3.4), entre les poteaux distants d'une portée  $P_e$ , le conducteur qui se courbe en forme de chaînette sous l'effet de son propre poids. Pour

diminuer la flèche du fil et son balancement sous l'effet du vent, il est nécessaire d'exercer une tension en étirant le conducteur (38). Le conducteur prend alors une flèche  $f$  d'autant plus faible que la tension sur le fil est forte et que la distance entre les poteaux est faible.

Mais il ne faut pas dépasser un certain effort sous peine de voir le fil se rompre. En général, la tension maximale  $T$  est limitée au 1/4 de la résistance à la rupture du matériau employé (38). La valeur de contrainte maximale admissible prise en compte dans les calculs des lignes laisse une marge pour tenir compte des effets du vent et du givre, mais ne protège pas d'un givrage exceptionnel des conducteurs des lignes électriques. Dans ce modèle, une approche simple a été utilisée afin de prendre en compte la flexibilité du conducteur de ligne. Cette flexibilité est définie par l'angle que fait la tangente à la courbe décrite par le conducteur de ligne avec la verticale comme indiqué à la figure (3.5).

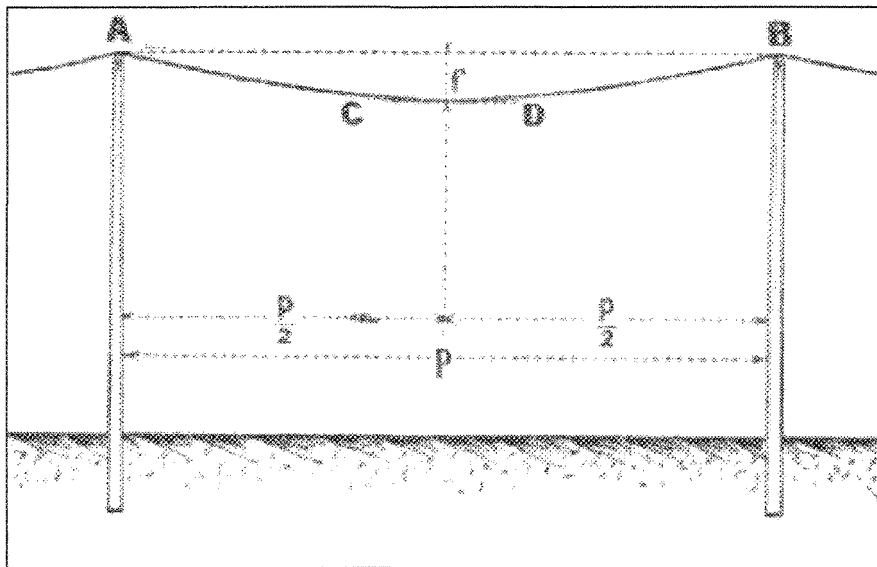


Figure.3.4 Schéma simplifié d'un conducteur de ligne sur le réseau

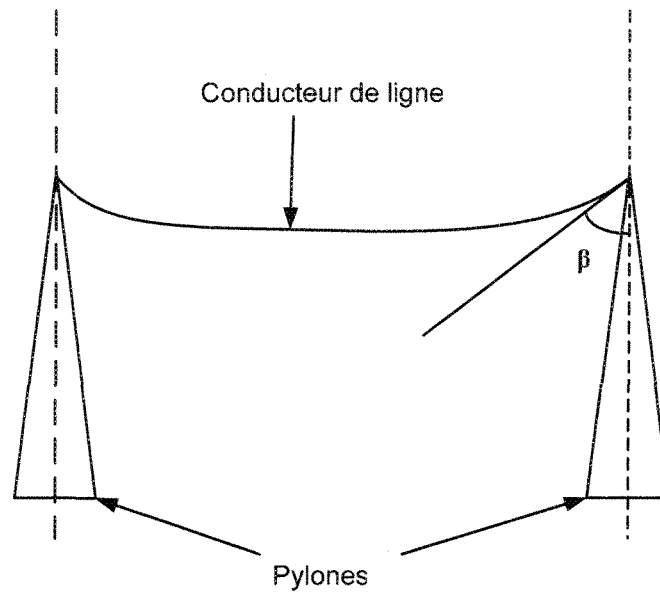


Figure.3.5 Flexibilité du conducteur de ligne représentée par l'angle  $\beta$

Pour tenir compte de cette courbure du conducteur, le cylindre demeure constant dans le domaine numérique mais les probabilités de mouvement, dans chacune des directions, sont influencées par la valeur de l'angle  $\beta$ . Les détails sont développés dans la section suivante.

### 3.7 Les probabilités de mouvement

Pour déterminer la probabilité du déplacement d'une particule liquide dans chacune des directions, nous avons posé des hypothèses. A savoir :

- à chaque étape du cheminement aléatoire d'une particule liquide, la probabilité de congélation reste constante;

- la probabilité qu'une particule liquide se déplace d'une cellule vers le haut, est nulle;
- en absence de vent, les probabilités de mouvement dans chacune des directions sont égales ;
- l'effet de la pression du vent sur le cheminement de la particule fluide a été défini de la façon suivante : le rapport de la différence entre la probabilité de mouvement en aval et la probabilité de mouvement en amont de la direction du vent, sur la probabilité de mouvement vers le bas est égal à la tangente de l'angle d'impact  $\phi$ .  
Le vent se dirige de la droite vers la gauche du domaine représenté à la figure (3.1);  
Il faut noter que nous ne prenons pas en compte la gravité et les charges de vent (traînée) qui ont un effet important sur la rotation du conducteur possédant une certaine rigidité en torsion et sur l'accumulation de glace résultante qui, à son tour, va influencer cette rigidité en torsion ;
- nous considérons une surface de cylindre lisse. En réalité les conducteurs de ligne tels que le Bersimis sont formés de brins de forme circulaire, cela conduit à une surface non lisse qui influence fortement le cheminement des gouttelettes d'eau qui sera guidé par les creux entre les brins.
- la somme de toutes les cinq probabilités de mouvement plus la probabilité de congélation est égale à 1.

Considérant l'inclinaison du conducteur de ligne causée par la gravité et la flexibilité des fils qui le compose, nous avons opté pour une démarche graphique afin de déterminer les différentes probabilités de mouvement. La figure (3.6) présente une vue de profil simplifiée du conducteur de ligne. Cette vue est obtenue lorsqu'on se place du côté droit du domaine (figure (3.1)) avec un regard perpendiculaire au cylindre suivant l'axe X.

Lorsque le cylindre est incliné les probabilités de mouvement vers la droite ( $P_{ZD}$ ) et vers le bas ( $P_{YB}$ ) sont respectivement obtenues par simples projections sur les axes Z et Y. Quant à la probabilité de mouvement vers la gauche ( $P_{ZG}$ ), dans le sens de l'inclinaison du cylindre, elle est égale à sa valeur lorsque le cylindre est parfaitement horizontal ( $\beta = 90$ ) plus les différences entre les probabilités  $P_{YB}$  et  $P_{ZD}$  et leur valeur respective lorsque le cylindre est horizontal.

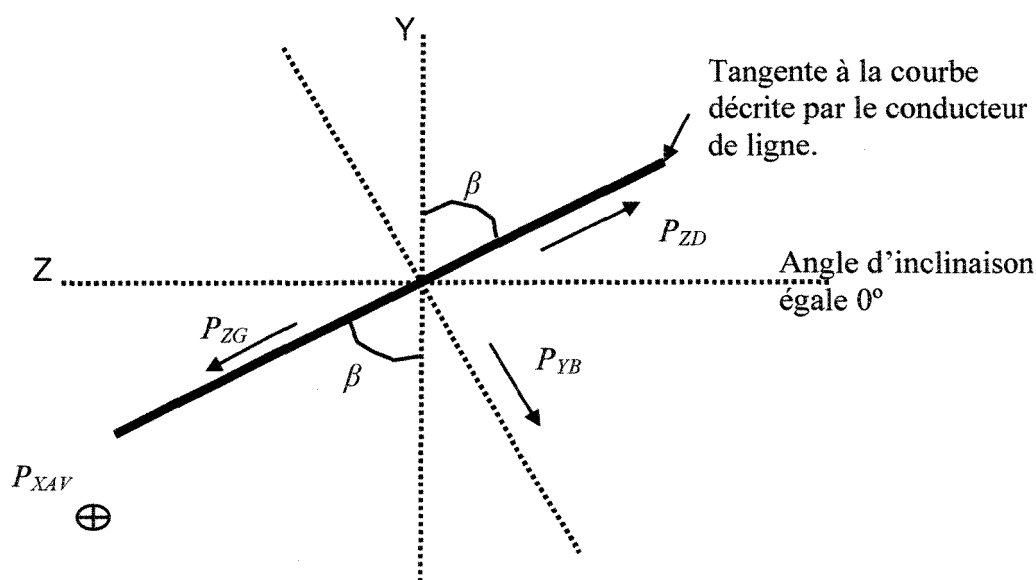


Figure.3.6 Vue de profile du cylindre incliné représentant son angle d'inclinaison

La lettre  $P$  est utilisée pour désigner la probabilité, la première lettre en indice représente l'axe suivant lequel se fait le mouvement :  $D$  pour la droite ;  $G$  pour la gauche ;  $B$  pour le bas ;  $Av$  pour aval ;  $A_m$  pour amont. Il faut préciser qu'après avoir calculé la probabilité de congélation, nous posons l'hypothèse selon laquelle pour une chute verticale des gouttelettes d'eau et un cylindre parfaitement horizontal la probabilité que la gouttelette d'eau se déplace est la même dans chacune des 5 directions du domaine de simulation. Cette probabilité est définie par l'équation suivante :

$$P_{Mo} = \frac{1 - P_c}{5} \quad (3.10)$$

En prenant en compte l'angle d'impact et l'angle d'inclinaison, la description faite de cette nouvelle approche décrite dans les paragraphes précédents peuvent se mettre sous formes équationnelles avec  $P_{Bh} = P_{Mo} \cos \phi$  désignant la probabilité de mouvement vers le bas lorsque le cylindre est parfaitement horizontal.

$$\begin{cases} \frac{P_{XAv} - P_{XAm}}{P_{Bh}} = \tan \phi \\ P_{XAv} - P_{XAm} = 1 - P_c - P_{Bh} - 2P_{Mo} \end{cases} \quad (3.11)$$

En résolvant ce système d'équation à deux inconnues nous obtenons:

$$\begin{aligned} P_{XAv} &= P_{Mo} \frac{(3 + \sin \phi - \cos \phi)}{2} \\ P_{XAm} &= P_{Mo} \frac{(3 - \sin \phi - \cos \phi)}{2} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Considérant l'inclinaison du cylindre d'un angle  $\beta$  par rapport au plan horizontal comme représenté à la figure 3.6, la probabilité qu'une gouttelette se déplace d'une cellule vers le bas devient :

$$P_{YB} = P_{Bh} \sin \beta \quad (3.13)$$

En se basant toujours sur la figure 3.6 et sur les paragraphes précédents on définit  $P_{ZD}$ .

$$P_{ZD} = P_{Mo} \sin \beta \quad (3.14)$$

On déduit alors  $P_{ZG}$  des autres probabilités calculées.

$$P_{ZG} = P_{Mo} (2 - \sin \beta + \cos \phi - \cos \phi \sin \beta) \quad (3.15)$$

Après la description des probabilités et l'implémentation de l'annexe 4 qui décrit le code de notre modèle nous présentons dans le chapitre les résultats obtenus par les simulations.



## **CHAPITRE 4**

### **RESULTATS ET DISCUSSION**

Au cours de la simulation, la pluie verglaçante a été discrétisée en particules liquides de forme cubique dont le volume après congélation est égal à  $1\text{mm}^3$ . Les simulations furent réalisées dans le domaine en trois dimensions représenté à la figure (3.1). Ce domaine est structuré en 6 000 000 de cellules cubiques dont le volume de chacune est égal à  $1\text{ mm}^3$ . Pour toutes les simulations, le cylindre a été soumis à la pluie verglaçante pendant 5 heures. Lorsque les particules liquides ont un angle d'impact nul, il n'y a pas de vent. Dans les sections suivantes, l'angle d'impact des particules liquides sera considéré comme nul jusqu'à ce que nous précisions le contraire.

#### **4.1 Influence du flux de chaleur externe sur l'accrétion**

Dans cette section, le cylindre est parfaitement rigide, c'est-à-dire horizontal. Pour un taux de précipitation égal à  $1\text{ mm.h}^{-1}$ , une durée de givrage de 5 heures et un flux de chaleur externe variant, les résultats des simulations sont présentés à la figure (4.1). Les différentes couleurs représentent les couches de glace successives. Pour de petites valeurs du flux de chaleur externe, la glace ne couvre pas entièrement le cylindre, comme indiqué aux figures (4.1a, b). La glace se forme préférentiellement sous le cylindre [figures(4.1a,b,c)]. Cela est dû à une combinaison optimale du flux de chaleur et de la disponibilité de l'eau au-dessous du cylindre qui conduit à la formation de glaçons. Une

élévation du flux de chaleur externe entraîne une augmentation de l'accrétion qui couvre éventuellement toute la surface du cylindre [figure (4.1d)]. Pour des valeurs plus élevées du flux de chaleur externe, la masse de glace sur la partie supérieure du cylindre augmente. Le début de processus peut se voir à la figure (4.1e). Toute l'eau interceptée gèle de préférence à la surface supérieure du cylindre, l'accrétion sur cette surface est plus grande que celle qui se trouve sur la surface inférieure. En conséquence la couche de glace ne couvre pas tout le cylindre, comme représenté aux figures (4.1e, f). Cela pourrait s'expliquer par le fait que le flux de chaleur externe est assez élevé pour geler les particules liquides quelques temps après leur impact, ainsi elles ont peu de chance d'atteindre le bas du cylindre.

L'influence du flux de chaleur externe sur la distribution de la masse de la glace est représentée à la figure (4.2). Le nombre de gouttelettes d'eau en surfusion interceptées augmente lentement avec le flux de chaleur externe. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la section du cylindre recouverte de glace augmente avec le flux de chaleur externe. Cependant nous avons une augmentation rapide de la masse de glace accumulée pour un flux de chaleur externe croissant, pour ensuite égaler la masse d'eau interceptée. Pour un flux de chaleur externe égal à  $140 \text{ W.m}^{-2}$ , toutes les gouttelettes interceptées sont presque entièrement incorporées dans la masse de glace existante. Le flux de chaleur externe devient assez élevé pour geler toutes les particules d'eau après leur impact. L'accumulation de la glace sous le cylindre a été comparée qualitativement avec la formation de glaçons. Les résultats des expériences réalisées par Maeno et Takahashi en 1984 (28) ont montré qu'une baisse de la température de l'air ambiant conduit à de longs glaçons. Ce comportement peut être émulé par notre modèle en augmentant le flux de chaleur externe.

En outre, les résultats des simulations réalisées indiquent qu'après que les glaçons aient atteint une longueur maximale à  $5 \text{ W.m}^{-2}$  (figure 4.1b), une augmentation supplémentaire du flux de chaleur externe (diminution de la température de l'air ambiant) entraîne la diminution en longueur des glaçons.

Cependant, dans les références (19) et (22) les glaçons ont respectivement atteint leur longueur maximale à 60 et 70  $\text{W.m}^{-2}$ . Cela pourrait s'expliquer par la taille des différents domaines, de même que par les différentes valeurs du taux de précipitation utilisées, 1  $\text{mm.h}^{-1}$  dans notre modèle et 5  $\text{mm.h}^{-1}$  dans les références (19) et (22). Toutefois, nous avons qualitativement un comportement identique.

#### **4.2 Influence du taux de précipitation sur l'accrétion de glace**

La figure (4.3a) représente la distribution de la masse de la glace accumulée en fonction du taux de précipitation. Le flux de chaleur est égal à  $30 \text{ W.m}^{-2}$ . La durée du givrage est également de 5 heures. Pour des valeurs du taux de précipitation proches de  $1 \text{ mm.h}^{-1}$ , presque la totalité des particules liquides interceptées est incorporée à la structure de glace existante. Cela peut s'expliquer par le fait que le flux de chaleur externe est assez grand pour geler les gouttelettes après leur impact. Par conséquent la masse de glace s'accumule en grande partie sur la partie supérieure du conducteur, et il y a une quasi-absence d'égouttement sous le cylindre. Tandis qu'à  $3 \text{ mm.h}^{-1}$ , nous avons une nette différence entre la masse interceptée et celle qui gèle sur le cylindre. Cela pourrait s'expliquer par le fait que, d'une part, une petite valeur du flux de la masse interceptée signifie qu'il y a plus de chance pour que toute l'eau gèle. D'autre part, une grande valeur

du flux de la masse interceptée signifie que la quantité, de l'eau à la surface de la structure de glace et que la masse de l'eau pendante sous le cylindre, croient (19). Sous l'effet de son poids, la masse d'eau pendante sous le cylindre est libérée de la structure de glace. Ce phénomène est en accord avec l'équation (3.6) dans laquelle la probabilité de congélation est inversement proportionnelle au taux de précipitation.

Les figures (4.3b, c) représentent la section de la structure de glace suivant le plan vertical passant par l'axe du cylindre, pour différentes valeurs du taux de précipitation. Nous pouvons observer une irrégularité de la longueur des glaçons pour chacune des simulations. La longueur des glaçons n'est pas uniforme. Cette observation est en accord avec les références (28, 29, 30). 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 cylindre, nous aurions pu avoir un rideau de glace compacte, mais nous avons plutôt des glaçons espacés. Ces résultats sont en accord avec les travaux de Bruyn (1977) (39) selon lesquelles l'espacement des glaçons est entièrement due à une instabilité de type *Rayleigh-Taylor* entre deux couches de fluides de densités différentes (42). Dans notre cas, il s'agit de l'eau et de l'air. Cette théorie est considérablement proche du processus naturel d'espacement des glaçons, comme cela arrive pendant les phénomènes de verglas.

Concernant la longueur des glaçons, il y a une augmentation avec le taux de précipitation. Cela pourrait s'expliquer par le fait que, pour de grandes valeurs du taux de précipitation, il y a suffisamment de gouttelettes qui parviennent au bout des glaçons.

Quant à la distance d'espacement, les figures (4.3b.c) montrent une distance d'espacement entre les glaçons variant de 5 mm à 19 mm, avec une valeur moyenne d'environ 16 mm. Cette valeur n'est pas trop éloignée de la valeur donnée expérimentalement par Makkonen et Fujii dans la référence (40). Dans notre travail, le diamètre du bout des glaçons a une valeur moyenne de 5 mm. Cette valeur est en accord avec les résultats expérimentaux réalisés dans les références (28,32).

#### **4.3 Influence de l'angle d'impact des gouttelettes d'eau sur l'accrétion de glace**

La présente section consistera à déterminer l'influence de l'angle d'impact des gouttelettes sur le processus d'accumulation de la glace. En réalité l'angle d'impact des gouttelettes d'eau dépend de la vitesse du vent qui varie constamment. Il dépend aussi de la taille des gouttelettes qui influent sur leur vitesse terminale. Mais dans ce travail de recherche cet angle aura une valeur constante durant chaque simulation. Le cylindre est parfaitement horizontal. La durée du givrage, le taux de précipitation et le flux de chaleur externe sont respectivement égal à, 5 heures,  $5 \text{ mm.h}^{-1}$ ,  $30 \text{ W.m}^{-2}$ . Dans un souci de simplification la taille des gouttelettes restera constante dans toutes les simulations parce qu'une certaine valeur de flux de chaleur implique une certaine vitesse de vent donc une variation de l'angle d'impact, l'implication physique de cette variation est que nous devrions faire varier la taille des gouttelettes.

Dans chaque simulation le vent se dirige de la droite vers la gauche, perpendiculaire au conducteur. La valeur de l'angle d'impact est mesurée à partir de la ligne de stagnation dans le sens des aiguilles d'une montre.

Le vent influence la trajectoire des gouttelettes. En utilisant les équations (3.7) et (3.9), l'angle d'impact des gouttelettes peut être déterminé pour une vitesse de vent et un taux de précipitation donnés. Selon les résultats d'une enquête de Bell Canada (Collins, 1971) utilisés par Stallabrass (1983) et qui a été effectuée sur une période de 10 années à l'aéroport international de Toronto, les vitesses minimale et maximale du vent pendant une pluie verglaçante sont respectivement de  $1.8 \text{ m.s}^{-1}$  et de  $14.9 \text{ m.s}^{-1}$ . En utilisant cette gamme de vitesse du vent, les résultats des simulations obtenus sont présentés à la figure (4.4).

Le flux de chaleur externe a été fixé à une valeur constante pendant les simulations, tandis que nous faisons varier l'angle d'impact des gouttelettes. Cela a permis d'examiner l'influence de l'angle d'impact des gouttelettes. Néanmoins, il faut noter que le flux de chaleur externe est intimement lié à la vitesse du vent dans la nature. Alors l'hypothèse de garder le flux de chaleur externe constant en faisant varier l'angle d'impact qui dépend de la vitesse du vent a été posée par soucis de simplification afin de voir l'influence de chacun des facteurs. La masse de glace accumulée augmente et la masse d'eau interceptée augmente lentement jusqu'à  $20^\circ$ . Ensuite, elles croissent rapidement pour atteindre leur valeur maximale à  $60^\circ$ , suivie d'une légère baisse de cette valeur pour des angles d'impact plus grands.

La croissance lente de  $0^\circ$  à  $20^\circ$  pourrait s'expliquer par le fait qu'une augmentation de l'angle d'impact des gouttelettes d'eau entraîne une augmentation de la surface de la structure de glace directement exposée aux gouttelettes. Cela implique une augmentation du

nombre de gouttelettes interceptées qui conduit à une grande quantité d'eau potentielle pour la congélation.

Pour des angles d'impact supérieur à  $20^\circ$ , la masse de glace accumulée et la masse d'eau interceptée augmentent rapidement, compte tenu du fait que la surface de la structure de glace directement exposée aux gouttelettes croît. Les gouttelettes atteignent directement une grande surface de la partie inférieure du conducteur couvert de glace.

Après avoir atteint leur valeur maximale à  $60^\circ$ , la masse de glace et la masse d'eau interceptée diminuent lentement. Nous devrions plutôt avoir une augmentation pour des valeurs plus grandes compte tenu du fait que le plan latéral de la structure de glace qui est directement exposé aux gouttelettes croît. Mais nous avons une diminution de la masse de glace et de la masse d'eau interceptée qui pourrait s'expliquer par le fait que sous le cylindre nous n'avons pas un rideau de glace mais plutôt des glaçons espacés. Donc pour des valeurs d'angles d'impact plus élevées certaines gouttelettes passent à travers ces espaces d'où une diminution lente de la masse d'eau interceptée qui entraîne une diminution de la masse de glace accumulée parce que dans ce modèle l'angle d'impact n'a pas d'influence sur la probabilité de congélation.

La forme de l'accrétion de glace pour différents angles d'impact est représentée à la figure (4.5). Il est apparent que la glace se forme de façon préférentielle sur la droite du conducteur, c'est-à-dire sur le côté qui fait face au vent. Avec une augmentation de l'angle d'impact, cette partie est plus exposée à la pluie verglaçante. Lorsqu'il y a formation de glaçons, ces derniers sont inclinés dans le sens du vent. Cela s'explique par le fait qu'après

l'impact des particules liquides à la surface de la structure de glace, leur cheminement est influencé par l'angle d'impact (vent). Donc, la probabilité que les gouttelettes se déplacent dans le même sens que le vent augmente avec l'angle d'impact.

#### **4.3.1 Influence du flux de chaleur externe sous une variation de l'angle d'impact des gouttelettes.**

Considérant la même direction du vent que dans la section précédente, la durée du givrage est de 5 heures. Puisque le taux de précipitation est égal à  $5 \text{ mm.h}^{-1}$ , l'angle d'impact des gouttelettes est de  $30^\circ$  avec la ligne de stagnation. Dans cette section nous faisons une comparaison entre la masse accumulée avec un angle d'impact de  $0^\circ$  et  $30^\circ$  pour différentes valeurs du flux de chaleur externe. Les résultats des simulations sont présentés à la figure (4.6). Nous avons des courbes qualitativement identiques dans les deux cas, dans lesquelles nous avons une augmentation rapide de la masse accumulée, tout comme celle interceptée par la structure de glace, avec l'augmentation du flux de chaleur externe pour ensuite devenir presque constante. La différence est plutôt qualitative. Comme nous pouvons le voir à la figure (4.6), pour le même taux de précipitation, la masse d'eau interceptée est plus élevée pour l'angle d'impact à  $30^\circ$ . Cette augmentation varie de 7% à 15% de la masse accumulée à  $0^\circ$ . Nous pourrions expliquer cette différence par le fait que, sous l'effet du vent les gouttelettes qui ont un angle d'impact supérieur à  $0^\circ$  heurtent la face latérale de la structure de glace qui décrit alors une surface plus grande par rapport à la surface supérieure à cause justement de la formation de glaçons. Aussi, l'angle d'impact est-il proportionnel à la vitesse d'impact des gouttelettes. Par conséquent, l'accumulation de glace croît plus vite à  $30^\circ$  qu'à  $0^\circ$ .



### 4.3.2 Influence du taux de précipitation sous une variation de l'angle d'impact des gouttelettes.

L'influence du taux de précipitation sous la variation de l'angle d'impact des gouttelettes est présentée dans la présente section. Les résultats de la simulation sont présentés à la figure (4.7). Le flux de chaleur externe est égal à  $30 \text{ W.m}^{-2}$  et la durée du givrage est de 5 heures. Ces valeurs sont restées constantes durant les simulations. Avec un angle d'impact égal à  $30^\circ$ , la masse totale de l'eau interceptée augmente plus rapidement avec une augmentation du taux de précipitation. Tandis que la masse accumulée à  $0^\circ$  ne croît sensiblement à la même vitesse qu'à  $30^\circ$ . Par contre, la masse de glace accumulée et la masse de l'eau interceptée sont plus élevées à  $30^\circ$ . Cela est dû à la vitesse d'impact des gouttelettes, qui augmente avec l'angle d'impact.

Presque la totalité de la masse d'eau interceptée gèle quelque part sur la structure de glace pour des valeurs proches de  $1 \text{ mm.h}^{-1}$ , soit 99%. Pour des valeurs plus grandes, cette proportion décroît plus on augmente le taux de précipitation. Pour un taux de précipitation de  $2 \text{ mm.h}^{-1}$ , nous avons environ 92% de la masse d'eau interceptée qui gèlent. Cette proportion décroît jusqu'à 30% pour un taux de précipitation égal à  $14 \text{ mm.h}^{-1}$ . Cela pourrait s'expliquer par le fait que pour des valeurs proches de  $1 \text{ mm.h}^{-1}$ , le flux de chaleur externe est assez élevé pour geler presque la totalité de la masse d'eau interceptée. A  $4 \text{ mm.h}^{-1}$  le flux de chaleur externe, qui n'est pas suffisant pour geler toute l'eau interceptée, conduit alors une perte considérable de l'eau interceptée par arrachement. Pour des valeurs plus grandes, nous avons un égouttement accru.

#### 4.4 L'influence de la flexibilité du conducteur de ligne sur l'accumulation de glace

Nous présentons à la figure (4.8a) qui concerne l'influence de l'angle d'inclinaison du cylindre sur le processus d'accumulation de la glace en régime humide. La diminution de l'angle entraîne une légère augmentation de la masse interceptée jusqu'à 50° suivie d'une augmentation significative. Néanmoins il y a une légère diminution suivie d'une augmentation significative de la masse de glace accumulée. Pour des angles d'inclinaison inférieurs à 50°, les particules liquides atteignent rapidement le bas de l'accumulation de glace sous l'effet de la force de gravité terrestre. Après avoir atteint le bas de l'accumulation, elles sont soumises au processus de délestage. C'est ce qui explique cette légère diminution de la masse de glace accumulée. Pour une inclinaison plus accentuée c'est-à-dire pour un angle  $\beta$  supérieur à 50°, nous observons le phénomène contraire, à savoir une augmentation de l'accumulation de glace. Après leur impact les gouttelettes d'eau en surfusion se déplacent de l'avant dans le sens de l'inclinaison du conducteur. De ce fait elles restent plus longtemps sur le conducteur ce qui fait qu'elles ont plus de chance de geler. Cette tendance à aller de l'avant est fonction du degré d'inclinaison du conducteur.

A 90°, c'est-à-dire pour un conducteur parfaitement tenu, 66% des gouttelettes d'eau en surfusion, interceptées par le conducteur ou la glace qui le recouvre, sont incorporées à l'accrétion de glace déjà existante. Pour des angles plus petits, la masse d'eau interceptée croît lentement tandis la masse de glace décroît lentement jusqu'à 50°. A 50° nous avons une diminution de 2,5% de la masse de glace par rapport à un conducteur parfaitement tendu (90°). De 50° à 10°, il y a une augmentation de 40% de la masse de glace accumulée,

toujours par rapport à l'angle de référence, c'est-à-dire  $90^\circ$ . Après  $30^\circ$  la différence, entre la masse interceptée et la masse de glace, diminue considérablement.

La figure (4.8b) concerne l'influence de l'angle d'inclinaison du cylindre sur le processus d'accumulation de la glace en régime sec. Les courbes décrivant la masse de glace accumulée et la masse d'eau interceptée sont presque confondues. Le flux de chaleur externe étant assez élevée, est suffisant pour incorporer presque la totalité des particules d'eau interceptées dans la glace existante. La masse de glace accumulée et la masse d'eau interceptée croissent lentement jusqu'à  $40^\circ$ , ensuite elles croissent plus rapidement pour des angles plus petits. Cette croissance rapide est due à l'effet combiné du flux de chaleur externe qui est assez élevé et des petites valeurs d'angle d'inclinaison qui oblige les particules liquides interceptées à rester longtemps sur la structure de glace. Une augmentation de la masse de glace accumulée implique une augmentation de la section transversale de la structure de glace d'où l'augmentation de la masse d'eau interceptée.

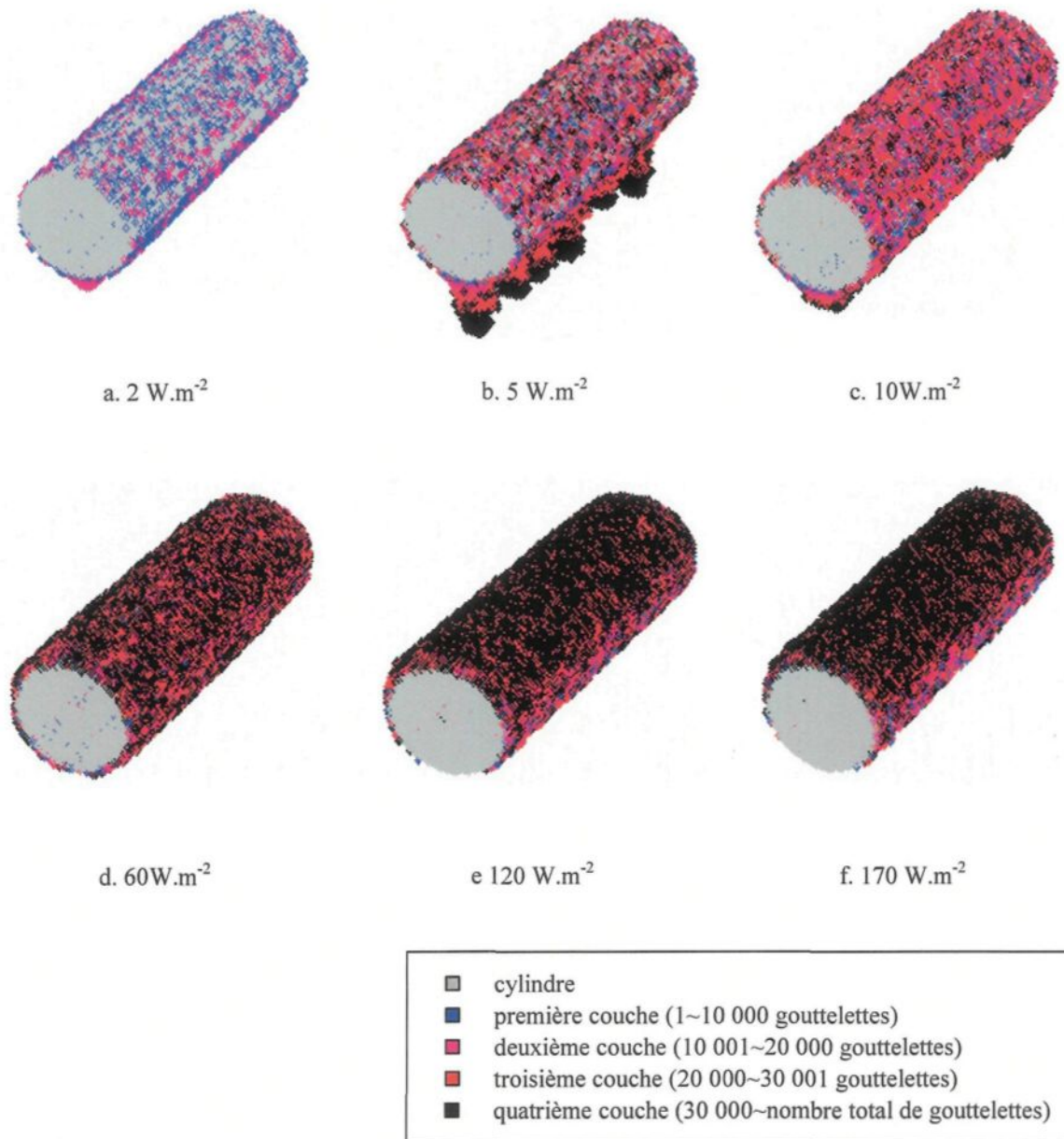


Figure.4.1 Influence du flux de chaleur externe sur la forme de l'accrétion. Taux de précipitation  $1 \text{ mm.h}^{-1}$ , temps de simulation 5 heures.

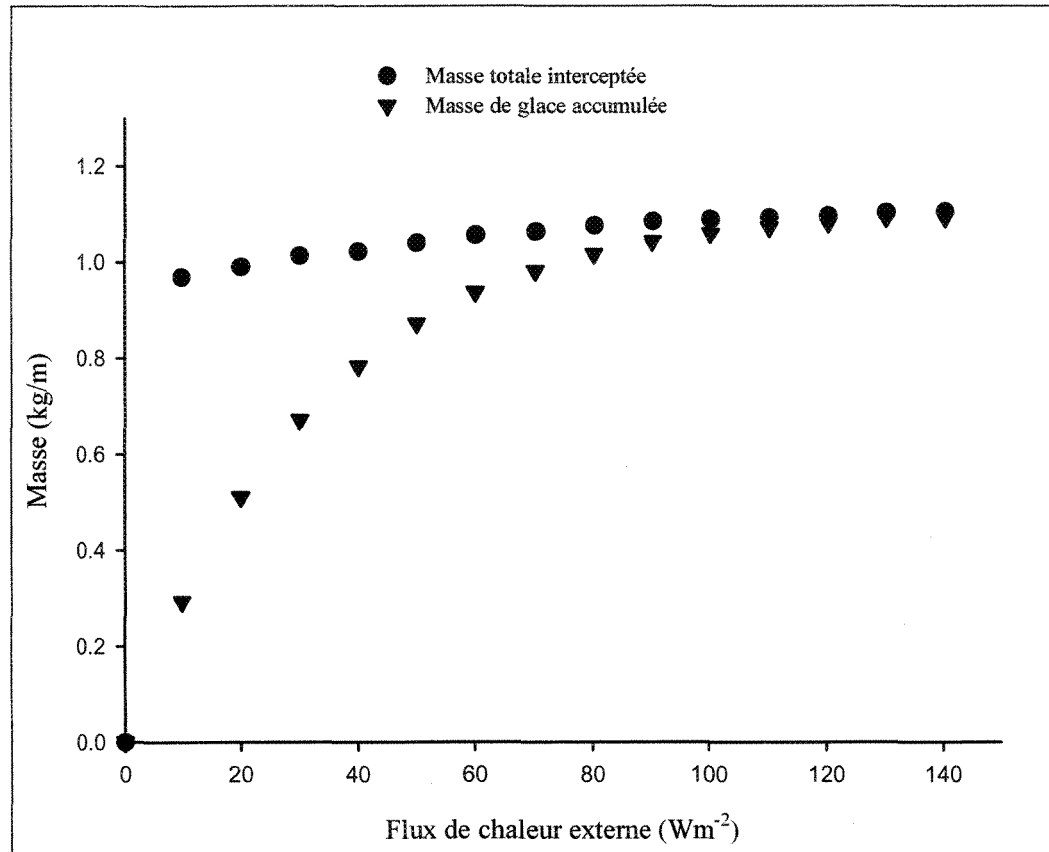


Figure.4.2 Influence du flux de chaleur externe sur la distribution de la masse. Taux de précipitation  $5 \text{ mm.h}^{-1}$ , temps de simulation 5 heures.

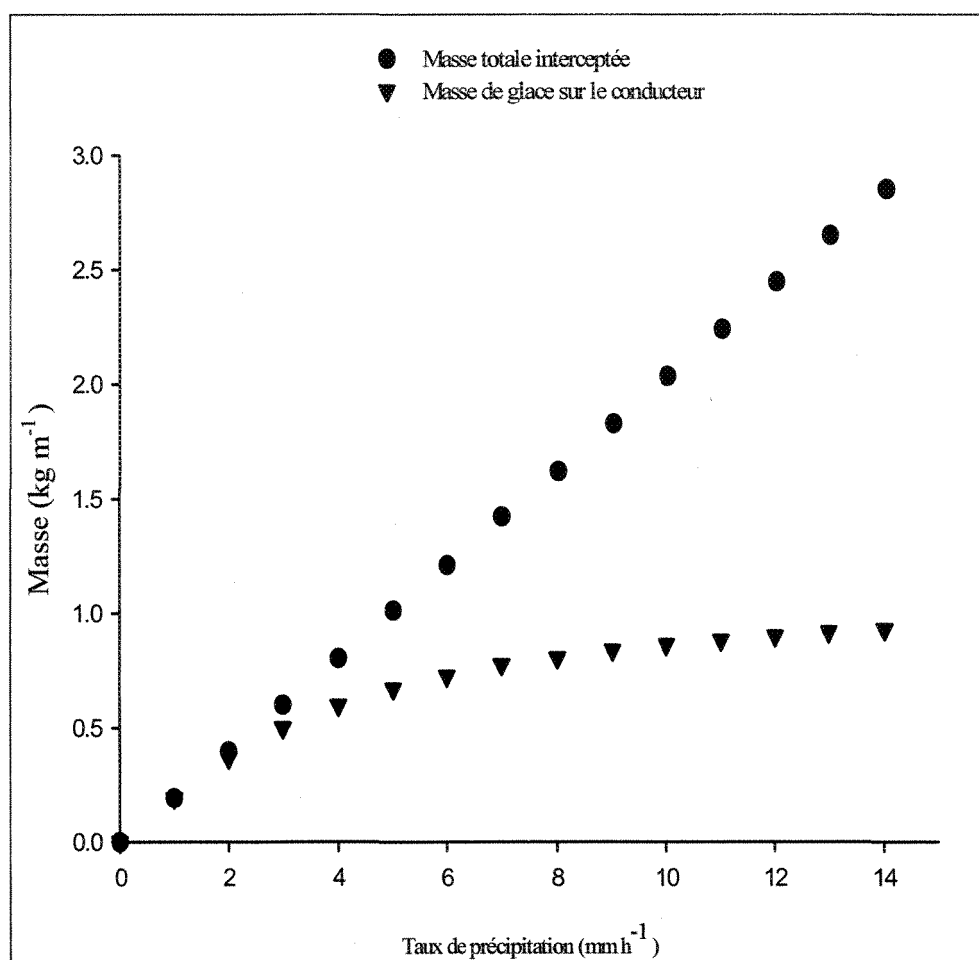


Figure. 4.3.a. Distribution de la masse de glace en fonction du taux de précipitation. Le flux de chaleur externe est de  $30 \text{ W.m}^{-2}$ .

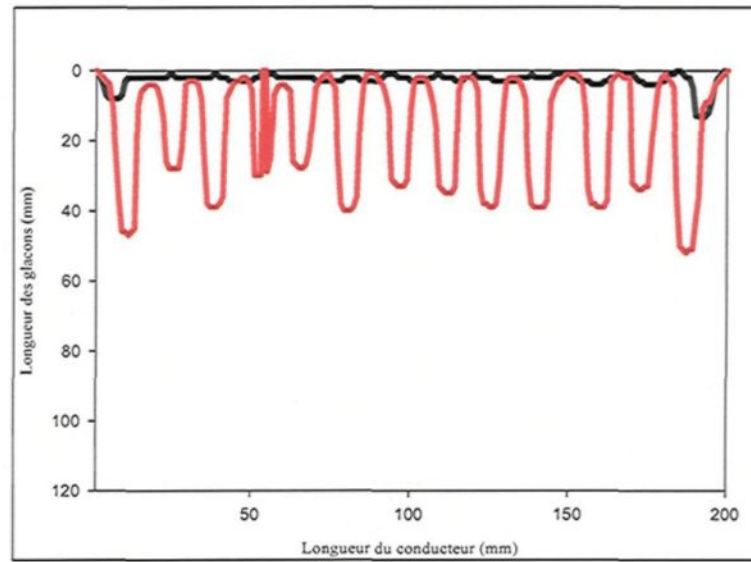


Figure. 4.3.b\*

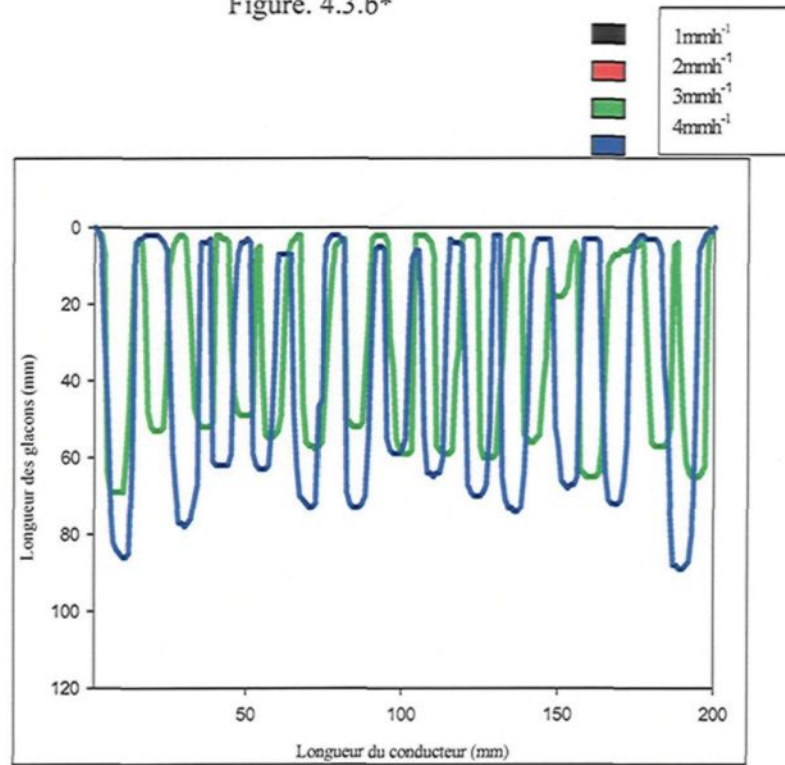


Figure. 4.3.c\*\*.

Figure. 4.3 Section de la structure de glace accumulée suivant le plan vertical passant par l'axe du cylindre, pour différentes valeurs du taux de précipitations. Flux de chaleur externe,  $30 \text{ W.m}^{-2}$ .  
 (\*) :  $1 \text{ mm.h}^{-1}$  et  $2 \text{ mm.h}^{-1}$ . (\*\*) :  $3 \text{ mm.h}^{-1}$  et  $4 \text{ mm.h}^{-1}$ .

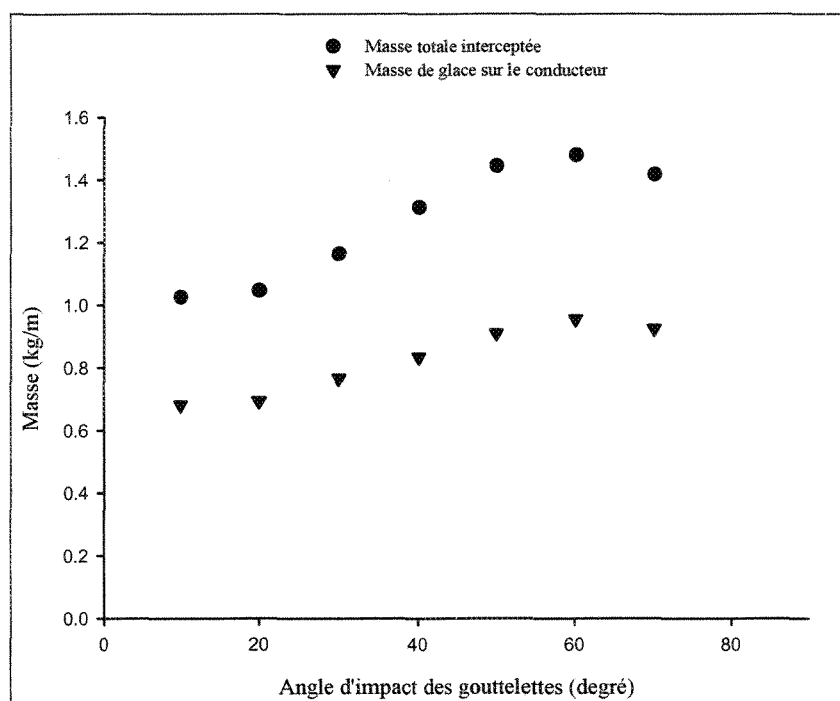


Figure. 4.4. Influence de l'angle d'impact des gouttelettes d'eau sur la distribution de la masse durant le processus d'accumulation de la glace. Flux de chaleur externe,  $30 \text{ W.m}^{-2}$ ; taux de précipitations,  $5 \text{ mm.h}^{-1}$ ; durée du givrage, 5 heures.



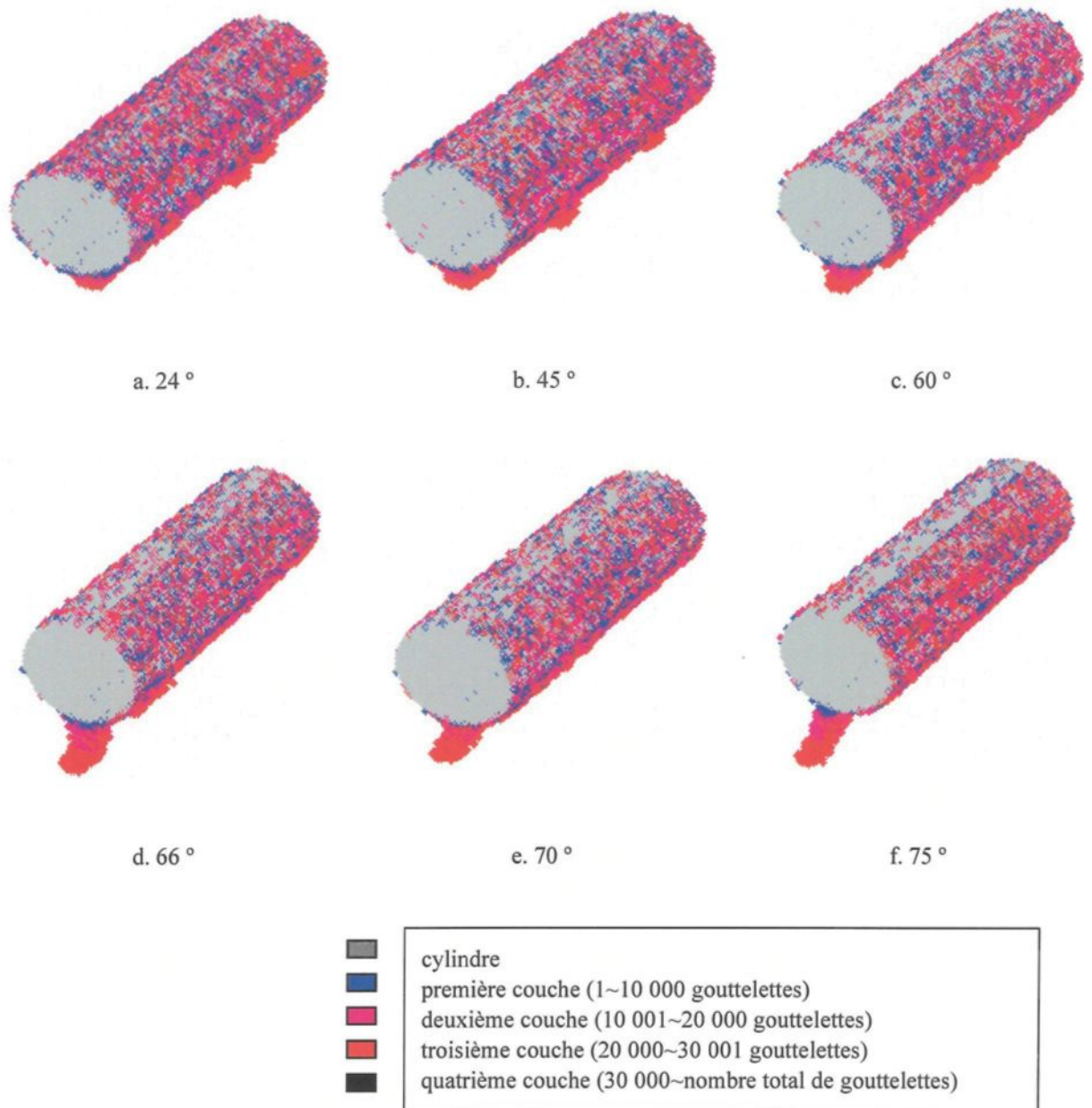


Figure.4.5 Formes de l'accumulation de glaces pour différentes valeurs de l'angle d'impact des gouttelettes d'eau. La direction du vent est de la droite vers la gauche perpendiculaire au conducteur. Taux de précipitation  $1\text{mm.h}^{-1}$ ; temps de simulation 5 heures; flux de chaleur externe  $5\text{ W.m}^{-2}$ .

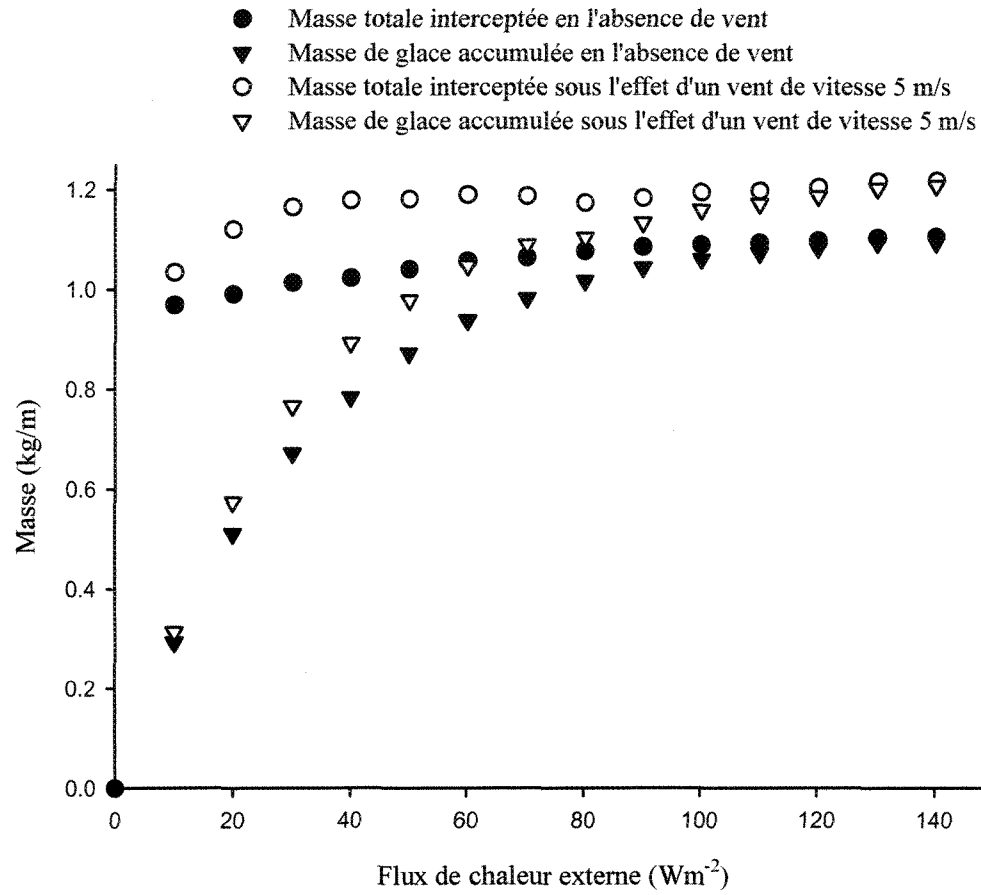


Figure.4.6 Influence du flux chaleur externe avec une variation de l'angle d'impact des gouttelettes d'eau. La direction du vent est de la droite vers la gauche perpendiculaire au conducteur. Taux de précipitations  $5 \text{ mm.h}^{-1}$ ; temps de simulation 5 heures.

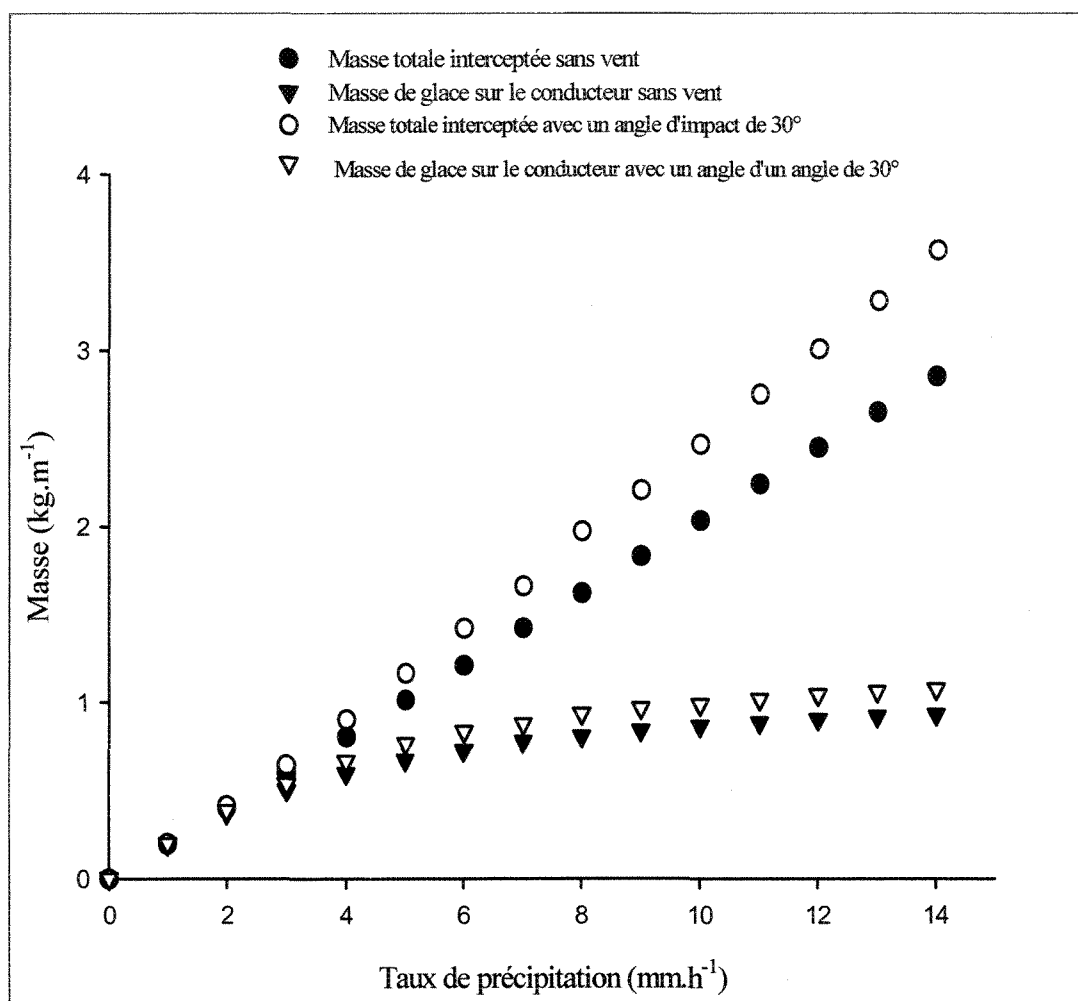


Figure.4.7 Influence du taux de précipitation sous l'action du vent. Le sens du vent est de la droite vers la gauche perpendiculaire au conducteur. Flux de chaleur externe  $30 \text{ W.m}^{-2}$ , temps de simulation 5 heures.

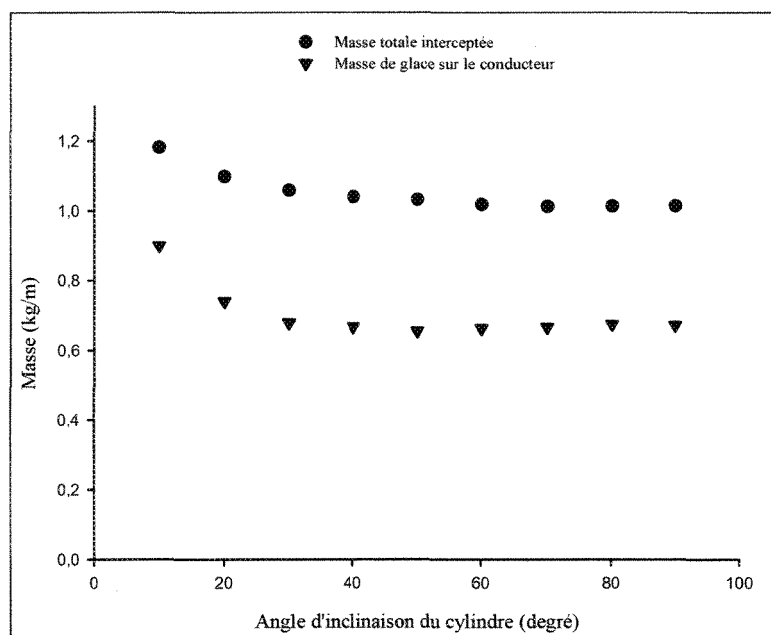


Figure. 4.8.a\*

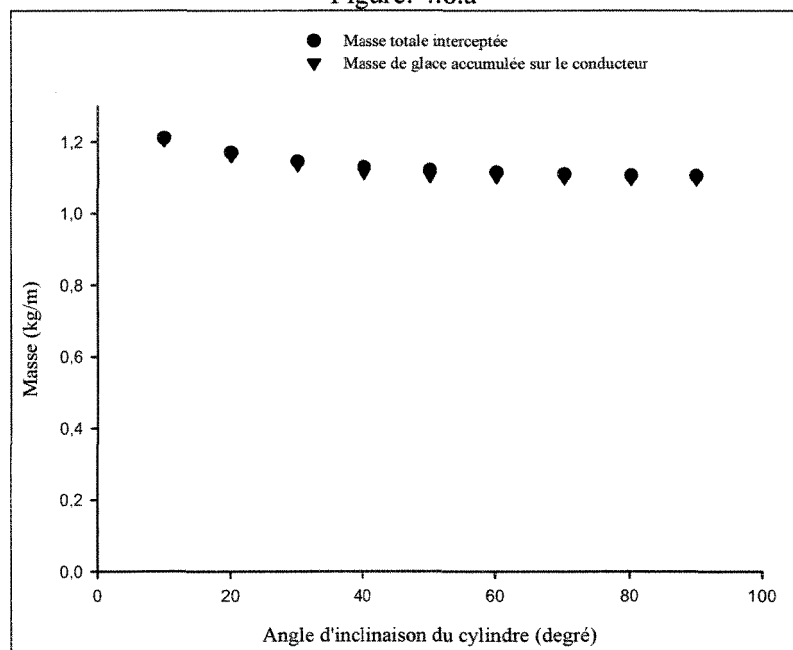


Figure. 4.8.b\*\*

Figure. 4.8. Influence de l'angle d'inclinaison  $\beta$  du cylindre sur le processus d'accumulation de glace. (\*) Régime humide. (\*\*) Régime sec. Taux de précipitation,  $5 \text{ mm.h}^{-1}$ ; Durée du givrage, 5 heures.

## CHAPITRE 5

### CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La méthode du cheminement aléatoire semble être adéquate pour la modélisation du givrage des câbles et conducteurs aériens. Le modèle tridimensionnel, basé sur cette méthode et élaboré dans le cadre de ce mémoire de maîtrise, a permis de prédire la forme et la masse de l'accrétion de glace sur un cylindre fixe (simulant un conducteur de ligne), suite à une pluie verglaçante. Le modèle a pris en compte l'inclinaison du cylindre, le taux de précipitation, le flux de chaleur externe et l'angle d'impact des gouttelettes. Les hypothèses suivantes ont été établies afin de simplifier le modèle :

- Les échanges thermiques à la surface de la structure de glace sont regroupés sous un terme unique appelé flux de chaleur externe. Ce terme est la résultante de la convection, de l'évaporation et de la radiation.

- Le sens du vent est horizontal et perpendiculaire au conducteur.

- Le flux de chaleur externe, lié intimement au vent dans la nature, n'est pas pris en compte dans ce modèle.

- La vitesse et la direction du vent restent constantes durant chaque simulation.

- La flexibilité du câble est réduite à l'angle  $\beta$  que fait la tangente à la courbe décrite par le conducteur et les appuis.

- La distribution de la taille des gouttelettes en fonction du taux de précipitation n'est pas considérée.

Au terme de notre étude nous pouvons conclure :

- 1) La formation de glaçons sous le cylindre dépend du transfert thermique à la surface de la structure de glace.
- 2) Cette formation de glaçons sous le cylindre dépend également du taux de précipitation.
- 3) Notre modèle est capable de simuler la forme, la charge de glace.
- 4) Ce modèle simule également l'irrégularité de la longueur des dendrites de glace sous le cylindre, en accord avec certains résultats expérimentaux.
- 5) L'espacement, des glaçons sous le cylindre, qui influence la charge de vent a pu être simulé par notre modèle. C'est une caractéristique très importante de la structure de glace, car à la charge verticale constituée par la glace, qui peut amener parfois le conducteur à entrer en contact avec le sol ou à s'en rapprocher dangereusement, s'ajoute l'action du vent sur le conducteur givré.
- 6) L'accrétion de glace est proportionnelle à l'angle d'impact des gouttelettes en surfusion.
- 7) L'inclinaison du cylindre influence le processus d'accumulation de la glace.

De ce qui précède, nous pouvons dire que les résultats de notre modèle sont qualitativement en accord avec certains travaux expérimentaux et modèles numériques déjà réalisés. Toutefois il présente des limites sur le plan quantitatif. Nous recommandons :

- 1) Que le conducteur soit étiré tout en tenant compte de sa tension de rupture et des contraintes économiques due à la portée. Cela est souvent difficile dans les régions montagneuses ou celles comportant des obstacles naturels tels que les cours d'eau importants ou des marécages ;
- 2) Que la taille du domaine de simulation soit agrandie afin de tenir compte de la hauteur à laquelle le cylindre est suspendu et de la longueur du cylindre ;
- 3) D'utiliser d'autres conditions limites qui tiennent compte de la longueur du cylindre, afin d'étudier leur influence sur le processus d'accumulation de la glace.
- 4) De considérer la distribution de la température à la surface de la structure de glace, en tenant compte de la température de l'air, de la température des gouttelettes, et l'effet calorifique dû au passage du courant dans le cylindre.
- 5) De prendre également en compte l'effet du vent puisqu'il influence à la fois le transfert de chaleur, l'angle d'impact des gouttelettes et le flux total d'eau.

- 6) De définir la probabilité de congélation en fonction de la température ambiante, du taux de précipitation, du transfert de chaleur thermique et du diamètre du cylindre à partir de données expérimentales.
- 7) Une répétitivité des résultats pour calculer la moyenne et l'écart type des valeurs obtenues en raison du caractère stochastique de la méthode.
- 8) De définir également le paramètre de délestage et le paramètre du champ de congélation à partir de données expérimentales afin d'obtenir des valeurs, du diamètre de l'extrémité des glaçons et de leur espacement, encore plus proches des résultats expérimentaux.
- 9) D'utiliser un autre logiciel pour la visualisation de la forme de la glace, parce que Sigmaplot ne peut traiter de gros fichiers, comme MayaVi, qui est capable de traiter de gros fichiers et de faire une rotation de 360 degrés dans tous les sens. Ce qui permettrait dans le même temps de définir l'angle d'inclinaison des glaçons sous le cylindre givré.
- 10) De développer un modèle numérique performant en utilisant un algorithme parallèle afin de simuler le cheminement aléatoire de plusieurs gouttelettes au même temps, comme cela se fait dans la nature.

Il serait intéressant d'améliorer notre modèle dans le cadre d'un doctorat, en tenant compte des recommandations ci-dessus. Une vérification expérimentale des résultats de ce nouveau modèle, précédé d'une optimisation serait d'un apport important dans la recherche sur le givrage.



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Châiné, P.M. and Skeates, P., 1974.** Ice Accretion Handbook (Freezing Precipitation).  
*Department of Environment, Atmospheric Environment Service. Industrial Meteorology Study VI, Toronto, Ontario, 158pp.*
2. **Jones, K.F., 1996.** A Simple Model for Freezing Rain Ice Loads. *The Proceedings 7<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Chicoutimi, Québec, pp.412-416.*
3. **Best, A.C., 1949.** The Size Distribution of Raindrops. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* 76, pp.16-36.
4. **Châiné, P.M. and Castonguay, 1974.** New Approach to Radial Ice Thickness Concept Applied to Bundle-like Conductors. *Industrial Meteorology Study IV, Environment Canada, Toronto, Ontario, 11pp.*
5. **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, 15pp.*
6. **McComber, P., 2000.** A Non-circular Accretion Shape Freezing Rain Model for Transmission Line Icing. *The Proceedings 9<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Chester, England, Session 7a.*

7. **Langmuir, I. and Blodgett, K.B.**, December 1944 - July 1945. A Mathematical Investigation of Water Droplet Trajectories. Vol.10, *Pergamon Press 196, Report N<sup>o</sup>.RL-224*, pp.348-355.
8. **Ludlam, F.H.**, 1951. The Heat Economy of a Rimed Cylinder. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 77#1, pp.663-666.
9. **Fraser, D., Rush, C.K. and Baxter D.**, 1952. Thermodynamic Limitations of Ice Accretions Instruments. *National Aeronautical Establishment (NAE), Laboratory Report LR-32, National Research Council (NRC), Ottawa, Canada*, 12pp.
10. **Messinger, B.L.**, 1953. Equilibrium Temperature of an Unheated Icing Surface as a Function of Airspeed. *Journal of the Aeronautical Sciences*, vol. 20, #1, pp.29-42.
11. **Lozowski, E.P., Stallabras, 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 (NRC) Laboratory report #LTR-LT-96*, 66pp.
12. **Stallabras, J.R.**, 1957. Icing Flight of a Bell HTL-4 Helicopter. *National Aeronautical Establishment, Laboratory Report #LR-197, National Research Council, Ottawa, Canada*, 14pp.
13. **Macklin, W.C.**, 1961. Accretion in Mixed Clouds. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 87, #1, pp.413-424.

14. Lozowski, E.P., Stallabrass, J.R. and Hearty, P.F., 1983. The Icing of an Unheated, Non-rotating Cylinder. Part I.: *A simulation model, Journal of Climatology and Applied Meteorology*, Vol. 22, pp.2053-2062.
15. Makkonen, L., 1984. Modelling of Ice Accretion on Wires. *Journal of Climatology and Applied Meteorology*, Vol. 23, N°6, pp.929-939.
16. Baker, P.G., Poots, G. and Rodgers, G.G., 1986. Ice Accretion on Cables of Various Cross-sections. *IMA Journal of Applied Mathematics* 36 (1), pp.11-28.
17. Makkonen, L., 1988. The Growth of Icicles. *The Proceedings 4<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Paris, France*, pp.236-242.
18. 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.
19. Szilder, K., 1994. Simulation of Ice Accretion on a Cylinder due to Freezing Rain. *Journal of Glaciology*, Vol 40, N°136, pp.586-594.
20. Szilder, K. and Lozowski, E.P., 1994. Stochastic Modeling of Icicle Formation. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol 116, pp.180-184.
21. Szilder, K. and Lozowski, E. P., 1995. A New Method of Modelling Ice Accretion on Objects of Complex Geometry. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, Vol 5, pp.37-42.

22. **Chen, Y.**, 2001, A 2D Random Walk Model for Predicting Ice Accretion on a Cylindrical Conductor. *MSc Thesis, Université du Québec à Chicoutimi, ISBN 0-612-65271-8*, 82pp.
  
23. **Szilder, K., Lozowski E.P. and Farzaneh, M.**, 1999. Morphogenetic Modeling of Wet Ice Accretions on Ground Wires as a Result of Freezing Rain. *The Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, Brest, France*, Vol. 2, pp.616-621.
  
24. **Chen, Y., Farzaneh, M. and, E. P. Lozowski**, 2000. Modelling of Ice Accretion on a Transmission Line Conductor. *The Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Chester, England*, p.8.
  
25. **Gunn, R. and Kinzer, G.D.**, 1949. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *Journal of Meteorology*, Vol 6, pp.243-248.
  
26. **Mason, B.J.**, 1971. The Physics of Clouds. *Clarendon Press, Oxford, 2<sup>nd</sup> Edition*, p.610.
  
27. **Hydro-Québec**, Août 1993. Critères de Conception de Lignes de Transport et Répartition d'Hydro-Québec. *SN-40.1*, pp.27-33.
  
28. **Maeno, N. and Takahashi, T.**, 1984. Studies on Icicles. I. General Aspect of the Structure and Growth of Icicles. *Low Temp Sci Ser A*, Vol 43, N° 6, pp.125-138.

29. Szilder, K. and Lozowski, E. P., 2002. A New Discrete Approach Applied to Modelling of in-Flight Icing. *Canadian Aeronautics and Space Journal*, Vol 48, N°3, pp.181-193.
30. Szilder, K. and Lozowski, E. P., 1995. Simulation of Icicle Growth Using a Three-dimensional Random Walk Model. *Atmospheric Research*, Vol 36, pp.243-249.
31. Szilder, K. and Lozowski, E. P., 1994. Stochastic Modeling of Icicle Formation. *Transactions of the ASME*, Vol.116, pp.180-184.
32. Chung, K. K. and Lozowski, E.P., 1990. On the Growth of Marine Icicles. *Atmosphere Ocean*, Vol 28, N° 4, pp.393-408.
33. Rudzinski, W., Lozowski, E. P. and Farzaneh, M., 2003. A Qualitative Comparison of Icing Experiments with a High-Resolution Full-scale 2D Model of Glaze Ice Accretion on a Non-energized Station Post Insulator. *The Proceedings 13<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, May 25-30, CD, 7pp.*
34. Szilder, K., Lozowski, E. P. and Reuter, G., 2001. A study of the Relation between Atmospheric Conditions, Ice Accretion Shape and Ice Load under Freezing Rain Conditions. *The Proceedings 20<sup>th</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering, Rio de Janeiro, Brazil, 27pp.*

35. Szilder, K., Lozowski, E. P., Forest, T., Reuter, G. and Gagnon, R., 2000. Modelling of Wet Ice Accretions that Result from Spray. *The 15<sup>th</sup> International Symposium on Ice, Gdańsk, Poland*, pp.323-330.
36. Szilder, K. and Lozowski, E. P., 2002. Simulation of Airfoil Icing with a Novel Morphogenetic model. *The Proceedings CEAS Conference, Cambridge, England*.
37. Fu, P., Bouchard, G. and Farzaneh, M., 2004. Simulation of Ice Accumulation on Transmission Line Cables Based on Time-Dependent Airflow and Water Droplet Trajectory Calculations. *The Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering: Polar and Arctic Sciences and Technology, Vancouver, British Columbia, Canada*.
38. Avril, C., 1974. Construction des Lignes Aériennes à Haute Tension. *Editions Eyrolles, Paris, France*, pp.45-59.
39. De Bruyn, JR., 1977. On the Formation of Periodic Arrays of Icicles. *Cold Regions Science and Technology*, vol 25, pp.225-229.
40. Makkonen, L. and Fujii, Y., 1993. Spacing of Icicles. *Cold Regions Science and Technology*, vol 21, pp.317-322.
41. Szilder, K. and Lozowski, E. P., 2000. Numerical Simulation of Pendant Ice Formations. *Cold Regions Science and Technology*, vol 31, pp.1-11.

42. Taylor, G.I., 1950. The Instability of Liquid Surfaces when Accelerated in a Direction Perpendicular to their Planes I, *The Proceedings Royal Society, London Ser A*, Vol 201, pp.192-196.

## Annexe 1

```
*****
*                               The FORTRAN program of Lozowski's model                               *
*****

      PROGRAM MAIN
      IMPLICIT NONE
      INTEGER I, J

*****
* Definition of the variables: *
* B, array to calculate the overall collision efficiency; Beta, array *
* to calculate the Collision efficiency for different angles; Cita, *
* the angles of divided upwind face of the cylinder; D, the droplet *
* diameter; Dc, the diameter of the cylinder; DeltaT, accretion time *
* step; E, the collection efficiency; EB, fonction to calculate the *
* collision efficiency; h, heat transfer coefficient; Pa, air pressure; *
* PI,  $\pi$ ; n, freezing fraction; R, icing flux; Roi, the density of the *
* ice; Rw, droplet mass flux; Rws, runback mass flux; ta, air *
* temperature; th, ice accretion thickness; ts, runback water *
* temperature; U, wind velocity; w, liquid water content; z, temporary *
* variable as 0. *
*****

      DOUBLE PRECISION B(0:18,1:9),Beta(0:18),Cita(0:18),D(1:9),Dc,
&DeltaT,E,EB,h,Pa,PI,n(0:18),R(0:18),Roi,Rw(0:18),Rws(0:18),
&ta,th(0:18),ts(0:18),U,w,z

      PARAMETER (PI = 3.1415926D0)

*****
*                               Input the parameters                               *
*****

      PRINT*, 'ENTER AIR TEMPERATURN (C), ta = '
```



```

READ(*,*) ta
PRINT*, 'ENTER WIND SPEED (m/s), U = '
READ(*,*) U
PRINT*, 'ENTER LIQUID WATER CONTENT (kg/m3), w = '
READ(*,*) w
PRINT*, 'ENTER AIR PRESSURE (Pa), Pa = '
READ(*,*) Pa
PRINT*, 'ENTER ACCRETION TIMESTEP (s), DeltaT = '
READ(*,*) DeltaT
Dc = 2.54D-2
ROI = 890.0D0

```

```

*****
*           The main calculation to get the thickness           *
*           of the accretion for each angular sector            *
*****

```

```

DO 100 I = 0,18
  CITA(I) = 5.0*I
  DO 200 J = 1,9
    D(J) = 5.0*J*1.0D-6
    B(I,J) = EB(U,Dc,Pa,ta,D,Cita,I,J)
200  CONTINUE
  Beta(I) = 0.06*B(I,1)+0.10*B(I,2)+0.19*B(I,3)+0.29*B(I,4)+
& 0.18*B(I,5)+0.08*B(I,6)+0.05*B(I,7)+0.035*B(I,8)+0.015*B(I,9)
  Rw(I) = Beta(I)*U*w
  Rws(I) = 0.0D0
  IF (I.EQ.1) Rws(I) = (1-n(I-1))*(Rw(I-1)+0.5*Rws(I-1))
  IF (I.GE.2) Rws(I) = (1-n(I-1))*(Rw(I-1)+Rws(I-1))
  z = 0.0
  IF (I.GE.1) THEN
    CALL ENT(U,w,ta,Pa,Rw(I),Cita(I),Rws(I),ts(I-1),Dc,n(I),ts(I))
  ELSE
    CALL ENT(U,w,ta,Pa,Rw(I),Cita(I),Rws(I),z,Dc,n(I),ts(I))
  END IF

```

```

      R(I) = n(I)*(Rw(I)+Rws(I))
      th(I) = (2.0*R(I)*DeltaT/ROi)/(1.0+(1.0+4.0*R(I)*DeltaT/
& (ROi*Dc)**0.5)
100 CONTINUE

```

```

*****
*                               Output the results                               *
*****

```

```

      OPEN (unit = 1, file = "Thickness")
      DO I = 0,18
      WRITE(1,300) th(I)
300  FORMAT(1x,E12.6)
      ENDDO
      CLOSE(unit = 1)
      STOP
      END

```

```

*****
*                               The function to calculate the collision efficiency   *
*****

```

```

      DOUBLE PRECISION FUNCTION EB(U,Dc,Pa,ta,D,Cita,I,J)
      IMPLICIT NONE
      DOUBLE PRECISION ROW, X, ROa,Pa,K, Rej, U, Dc, ta, MU,
&PI,BETA0,k0,E,CITAM,CITA(0:18),B(0:18,1:9),D(1:9),MUa
      INTEGER I,J
      PI = 3.1415926
      ROW = 1.0D3
      MUa = MU(ta)
      ROa = Pa/(287.05*(ta+273.15))
      Rej = D(J)*U*ROa/MUa
      K = (ROW*U*D(J)**2.0)/(9.0*MUa*Dc)
      K0 = 0.125+(K-0.125)/(1.0+0.0967*Rej**0.6367)

```

```

IF (K0.LT.0.125) THEN
  BETA0 = 0.0
  E = 0.0
  CITAM = 0.0
END IF
IF ((K0.GE.0.125).AND.(K0.LE.7.5)) THEN
  BETA0 = 1.4*(K0-0.125)**0.84/(1+1.4*(K0-0.125)**0.84)
ELSE IF (K0.GE.7.5) THEN
  BETA0 = K0/(1+K0)
END IF
IF ((K0.GE.0.125).AND.(K0.LT.0.9)) THEN
  E = 0.489*(DLOG10(8.0*K0))**1.978
ELSE IF (K0.GE.0.9) THEN
  E = K0/(PI/2.0+K0)
END IF
IF ((K0.GE.0.125).AND.(K0.LE.10.0)) THEN
  CITAM = (ATAN(1.7*(K0-0.125)**0.76))*180.0/PI
ELSE IF (K0.GE.10.0) THEN
  CITAM = (ATAN(K0))*180.0/PI
END IF
IF (CITA(I).LT.CITAM) THEN
  EB = BETA0*COS(CITA(I)/CITAM*PI/2.0)+PI**3.0/
& ((CITAM*PI/180.0)**3*(PI**2-4.0))*(E-2.0*CITAM*BETA0/180.0)*
& (CITA(I)*PI/180.0)**2*SIN(CITA(I)/CITAM*PI)
ELSE
  EB = 0.0
END IF
RETURN
END

```

```
*****
*           Function to calculate the absolute viscosity of air           *
*                               as a function of temperature                *
*****
```

```
DOUBLE PRECISION FUNCTION MU(T)
IMPLICIT NONE
DOUBLE PRECISION MU0,t0,C,T
MU0 = 1.8325D-5
t0 = 296.16D0
C = 120.0D0
MU = MU0*((t0+C)/(T+273.15+C))*((T+273.15)/t0)**(3.0/2.0)
RETURN
END
```

```
*****
*           The subroutine to calculate the saturation vapour pressure      *
*                               as a function of different temperature        *
*****
```

```
SUBROUTINE EVP(T,E)
DOUBLE PRECISION T,E
E = 611.2*DEXP(17.67*T/(T+243.5))
RETURN
END
```

```
*****
*           The function to calculate the heat transfer coefficient          *
*****
```

```
DOUBLE PRECISION FUNCTION Eh(Cita,U,ta,Dc,Pa)
IMPLICIT NONE
DOUBLE PRECISION Dc,Ka,Nu,Cita,Rec,X,ROa,K,U,ta,MU,PI,Pa,MUa
PI = 3.1415926
```

```

Ka = 2.53D-2
MUa = MU(ta)
ROa = Pa/(287.05*(ta+273.15))
Rec = U*Dc*ROa/MUa
Nu = Rec**(0.5)*(2.4+1.2*SIN(3.6*(Cita*PI/180.0-0.44)))
Eh = Ka*Nu/Dc
RETURN
END

```

```

*****
*           The subroutine to calculate the freezing fraction or           *
*           the runback water temperature                                *
*****

```

```

SUBROUTINE ENT(U,w,ta,Pa,Rw,Cita,Rws,tss,Dc,n,ts)
IMPLICIT NONE
DOUBLE PRECISION h,ta,ts,ea,es,e0,lv,cp,epsilon,Cita,
&Rw,Rws,n,tss,f,lfs,Pr,Sc,rc,cw,n1,n2,t1,t2,f1,f2,Eh,Et,E,
&E1,E2,Dc,U,En,t,w,Pa,PI
EN(n) = h*ta+h*(Pr/Sc)**0.63*lv*epsilon/(Pa*cp)*(ea-e0)+
&h*rc*U**2.0/(2.0*cp)+0.5*Rw*U**2+Rw*lfs*n+Rw*cw*ta+
&Rws*cw*tss+Rws*lfs*n
ET(t) = h*(ta-t)+h*(Pr/Sc)**0.63*lv*epsilon/(Pa*cp)*(ea-
&611.2*DEXP(17.67*t/(t+243.5)))+h*rc*U**2.0/(2.0*cp)+
&0.5*Rw*U**2.0+Rw*lfs+Rw*cw*(ta-t)
&+Rws*cw*(tss-t)+Rws*lfs
CALL EVP(ta,ea)
h = Eh(Cita,U,ta,Dc,Pa)
e0 = 611.2D0
cp = 1005.0D0
cw = 4.27D3
lfs = 3.337D5
lv = 2.5008D6
epsilon = 0.622D0
PI = 3.1415926D0

```

```

Pr = 0.711D0
Sc = 0.595D0
rc = 0.75+0.25*COS(2.0*(Cita*PI/180.0))
n1 = -10.0D0
n2 = 15.0D0
F1 = En(n1)
F2 = En(n2)
10  n = (n1+n2)/2.0
    F = En(n)
    IF (SIGN(F,F1).EQ.F) THEN
        n1 = n
        F1 = F
    END IF
    IF (SIGN(F,F2).EQ.F) THEN
        n2 = n
        F2 = F
    END IF
    IF ((ABS(n1-n2).GT.1.0D-10).OR.(F.GT.1.0D-12)) GOTO 10
    IF (F.GT.1.0D-12) n = (n1+n2)/2.0
    IF (n.GT.1.0) THEN
        n = 1.0d0
        t1 = -40.0D0
        t2 = 10.0D0
        E1 = Et(t1)
        E2 = Et(t2)
20  ts = (t1+t2)/2.0
    E = Et(ts)
    IF (SIGN(E,E1).EQ.E) THEN
        t1 = ts
        E1 = E
    END IF
    IF (SIGN(E,E2).EQ.E) THEN
        t2 = ts
        E2 = E
    END IF
    IF ((ABS(t1-t2).GT.1.0D-10).OR.(E.GT.1.0D-12)) GOTO 20

```

```
IF (E.GT.1.0D-12) ts = (t1+t2)/2.0  
END IF  
RETURN  
END
```

## Annexe 2

```
*****
*           The FORTRAN program of Makkonen's numerical model           *
*****
```

```
PROGRAM MAIN
IMPLICIT NONE
```

```
*****
* Definition of the variables                                           *
* AT, accretion duration; d, droplet diameter; D0, the bare cylinder   *
* diameter; Dc, the cylinder diameter in the each step of calculation; *
* DeltaT, time step; Dn, the cylinder diameter calculated in the      *
* each step; E, cylinder collection efficiency calculated as a        *
* fractional sum of the collection efficiencies for each droplet      *
* size category; EKO, name of the function; Em, collection            *
* efficiency calculated using the median volume droplet; h, heat      *
* transfer coefficient; I, icing intensity; KO, parameter to calculate *
* E; M, ice load; Mn, ice load in each step; n, freezing fraction;    *
* PI,  $\pi$ ; R, Mackin's density parameter; RO, ice density;            *
* ta, air temperature; TRO, total deposit density; v, wind velocity;  *
* w, liquid water content; Y, counter.                                *
*****
```

```
DOUBLE PRECISION AT, d, D0, Dc, DeltaT, Dn, E, Em, h, I, KO, M,
DOUBLE PRECISION Mn, N, PI, Pa, R, RO, ta, TRO, ts, v, w, Y
PARAMETER (PI=3.1415926D0)
```

```
WRITE(*,*) 'PLEASE INPUT THE AIR TEMPERATURE:'
READ*, ta
WRITE(*,*) 'PLEASE INPUT THE WINDSPEED:'
READ*, v
WRITE(*,*) 'PLEASE INPUT THE WATER CONTENT:'
READ*, w
WRITE(*,*) 'PLEASE INPUT THE DROPLET DIAMETER:'
READ*, d
```



```

WRITE(*,*) 'PLEASE INPUT THE CYLINDER DIAMETER:'
READ*, Dn
WRITE(*,*) 'PLEASE INPUT THE AIR PRESSURE:'
READ*, Pa
WRITE(*,*) 'PLEASE INPUT THE ACCRETION DURATION:'
READ*, AT
WRITE(*,*) 'PLEASE INPUT THE TIME STEP:'
READ*, DeltaT

Mn=0.0D0
D0=Dn

OPEN(UNIT=2, FILE="RESULT")

DO 100, Y=0, AT, DeltaT
  M=Mn
  Dc=Dn
  K0=EK0(v,d,Dc,ta,Pa)
  CALL EEM(K0,Em)
  CALL EQU(Em,E)
  h=EH(v,Dc,ta,Pa)
  CALL En(E,v,w,ta,Dc,h,Pa,n)
  CALL ETS(E,v,w,ta,h,Pa,ts)
  CALL ER(K0,d,ts,v,R)
  CALL ERO(R,RO)
  I=n*E*v*w/PI
  Mn=M+I*PI*Dc*DeltaT*36.0D2
  Dn=(4.0*(Mn-M)/(PI*RO)+Dc**2)**(1.0/2.0)
  TRO=4.0*Mn*(PI*Dn**2-PI*D0**2)**-1
  WRITE(2,200) Y, Dc*1.0D2, I*2.0d4, RO, M, TRO, n, E
10  FORMAT(1x,f8.2, 2x, f8.4, 2x, f8.4, 2x,f8.4, 2x,f8.4, 2x,
& f8.4,2x, f8.4,2x, f8.4,2x, f8.4)
10  CONTINUE

CLOSE(unit = 2)

```

STOP

END

```
*****
*                               Function to calculate the parameter K0                               *
*****
```

```
DOUBLE PRECISION FUNCTION EK0(v,d,Dc,ta,Pa)
IMPLICIT NONE
DOUBLE PRECISION Row, X, Roa, K, Red, v, Dc, d, ta, MU,
& a,b,MU0,Pa
Row=1.0D3
X=MU(ta)
mu0=1.8325D-5
Roa=Pa/(287.05*(ta+273.15))
K=(Row*v*d**2.0)/(9.0*x*Dc)
Red=Roa*d*v/x
EK0=K*(0.087*Red**(0.76*Red**-0.027)+1)**-1
RETURN
END
```

```
*****
*                               Function to calculate the absolute viscosity of air                               *
*                               as a function of temperature                               *
*****
```

```
DOUBLE PRECISION FUNCTION MU(T)
IMPLICIT NONE
DOUBLE PRECISION MU0,t0,C,T
MU0=1.8325D-5
t0 = 296.16D0
C = 120.0D0
MU=MU0*((t0+C)/(T+273.15+C))*((T+273.15)/t0)**(3.0/2.0)
RETURN
```

END

```
*****
*           Subroutine to calculate collection efficiency           *
*           calculated using the median volume droplet Em          *
*****
```

```
SUBROUTINE EEM(K,Em)
IMPLICIT NONE
DOUBLE PRECISION Em, K, ESE, EGE
IF (K.GT.0.8) THEN
  Em = K**1.1*(K**1.1+1.426)**-1
ELSE
  Em = 0.5*(DLOG10(8.0*K))**1.6
END IF
RETURN
END
```

```
*****
*           Subroutine to calculate collection efficiency E with Em *
*****
```

```
SUBROUTINE EQU(Em,E)
DOUBLE PRECISION Em,E
E=0.69*EM**0.67+0.31*EM**1.67
END
```

```
*****
*           Function to calculate convective heat transfer coefficient h *
*****
```

```
DOUBLE PRECISION FUNCTION EH(v,Dc,ta,Pa)
DOUBLE PRECISION v,Dc,ta,Ka,Roa,a,x,mu,Pa
```

```

Roa=Pa/(287.05*(ta+273.15))
Ka=2.53D-2
X=MU(ta)
EH=Ka*0.032*(Roa*Dc*v/X)**0.85/Dc
END

```

```

*****
*           Subroutine to calculate the freezing fraction n           *
*****

```

```

SUBROUTINE En(E,v,w,ta,Dc,h,Pa,n)
IMPLICIT NONE
DOUBLE PRECISION PI,SBC,Cw,Ci,k,Le,a,Lf,Cp,Pa,r,t1,t2,
& w,h,ea,Dc,n, e0,ts,ta,E,v,c,b,x,y,z
PI=3.1415926D0
Lf=0.3337D6
k=0.62D0
Le=2.5008D6
Cp=1005D0
r=0.79D0
Cw=4218D0
SBC=5.6697D-8
a=8.1D7
CALL EVP(0.0,e0)
CALL EVP(ta,ea)
n=PI*h*(-ta+k*Le*(e0-ea)/(Cp*Pa)-r*v**2.0/(2.0*Cp))/
& (2.0*E*v*w*Lf)-ta/Lf*(Cw+PI*SBC*a/(2.0*E*v*w))
IF (n.GT.1) THEN
n=1
END IF
RETURN
END

```

```
*****
*      Subroutine to calculate the saturation water vapour pressure      *
*****
```

```
      SUBROUTINE EVP(T,E)
      DOUBLE PRECISION T,E
      E=0.6112*DEXP(17.67*T/(T+243.5))*1.0D3
      RETURN
      END
```

```
*****
*      Subroutine to calculate the ice accretion surface temperature ts  *
*****
```

```
      SUBROUTINE ETS(E,v,w,ta,h,Pa,ts)
      IMPLICIT NONE
      DOUBLE PRECISION F,F1,F2,PI,SBC,Lf,Cw,Ci,k,Ls,Cp,Pa,r,
& E,v,w,h,ea,t1,t2,ts,ta,a,EF,t
      EF(t)=2*E*v*w*(Lf + Cw*ta - Ci*t)/PI - h*((t - ta)
& +k*Ls*(0.6112*DEXP(17.67*t/(t+243.5))*1.0D3-ea)/
& (Cp*Pa)-r*v**2/(2*Cp))-SBC*a*(t-ta)
      PI=3.1415926D0
      SBC=5.6697D-8
      Lf=0.3337D6
      Cw=4218D0
      Ci=2106D0
      k=0.62D0
      Ls=2.8366D6
      Cp=1005D0
      r=0.79D0
      a=8.1D7
      CALL EVP(ta,ea)
      t1=-40.0D0
      t2=10.0D0
```

```

      F1=EF(t1)
      F2=EF(t2)
10   ts = (t1 + t2)/2.0
      F=EF(ts)
      IF (SIGN(F,F1).EQ.F) THEN
        t1=ts
        F1=F
      END IF
      IF (SIGN(F,F2).EQ.F) THEN
        t2=ts
        F2=F
      END IF
      IF ((ABS(t1-t2).GT.1D-10).OR.(F.GT.1D-12)) GOTO 10
      IF (F.GT.1D-12) ts=(t1+t2)/2.0
      RETURN
      END

```

```

*****
*           Subroutine to calculate Macklin's density parameter      *
*****

```

```

SUBROUTINE ER(K0,dm,ts,v,R)
  IMPLICIT NONE
  DOUBLE PRECISION K0, R, dm, ts, v, v0
  IF (K0.LE.0.55) THEN
    v0=v*(-0.174+1.464*K0-0.816*K0**2)
  ELSE
    v0=v*(0.561+0.592*DLOG10(K0)-0.26*(DLOG10(K0))**2)
  END IF
  IF ((ts.gt.0.0d0).or.(abs(ts).lt.1.0D-8)) THEN
    R=70.0D0
  ELSE
    R=-v0*dm*1.0D6/(2.0*ts)
  END IF

```

RETURN

END

\*\*\*\*\*

\* Subroutine to calculate ice density  $\rho$  \*

\*\*\*\*\*

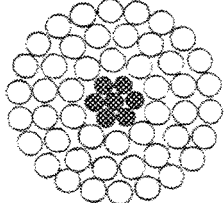
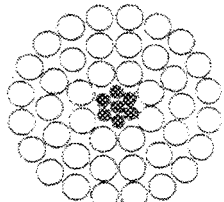
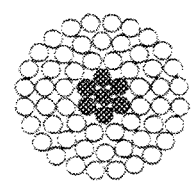
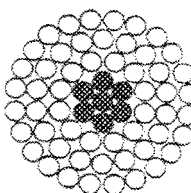
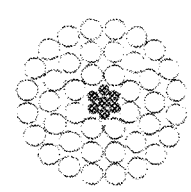
```

SUBROUTINE ERO(R,RO)
DOUBLE PRECISION R,RO
IF (R.LT.0.9) THEN
  RO = 100D0
ELSE IF (R.LE.10.0) THEN
  RO = 0.11 * R**0.76*1.0D3
ELSE IF (R.LE.60.0) THEN
  RO=(R*(R+5.61)**-1)*1.0D3
ELSE
  RO=0.92D3
ENDIF
RETURN
END

```

### Annexe 3

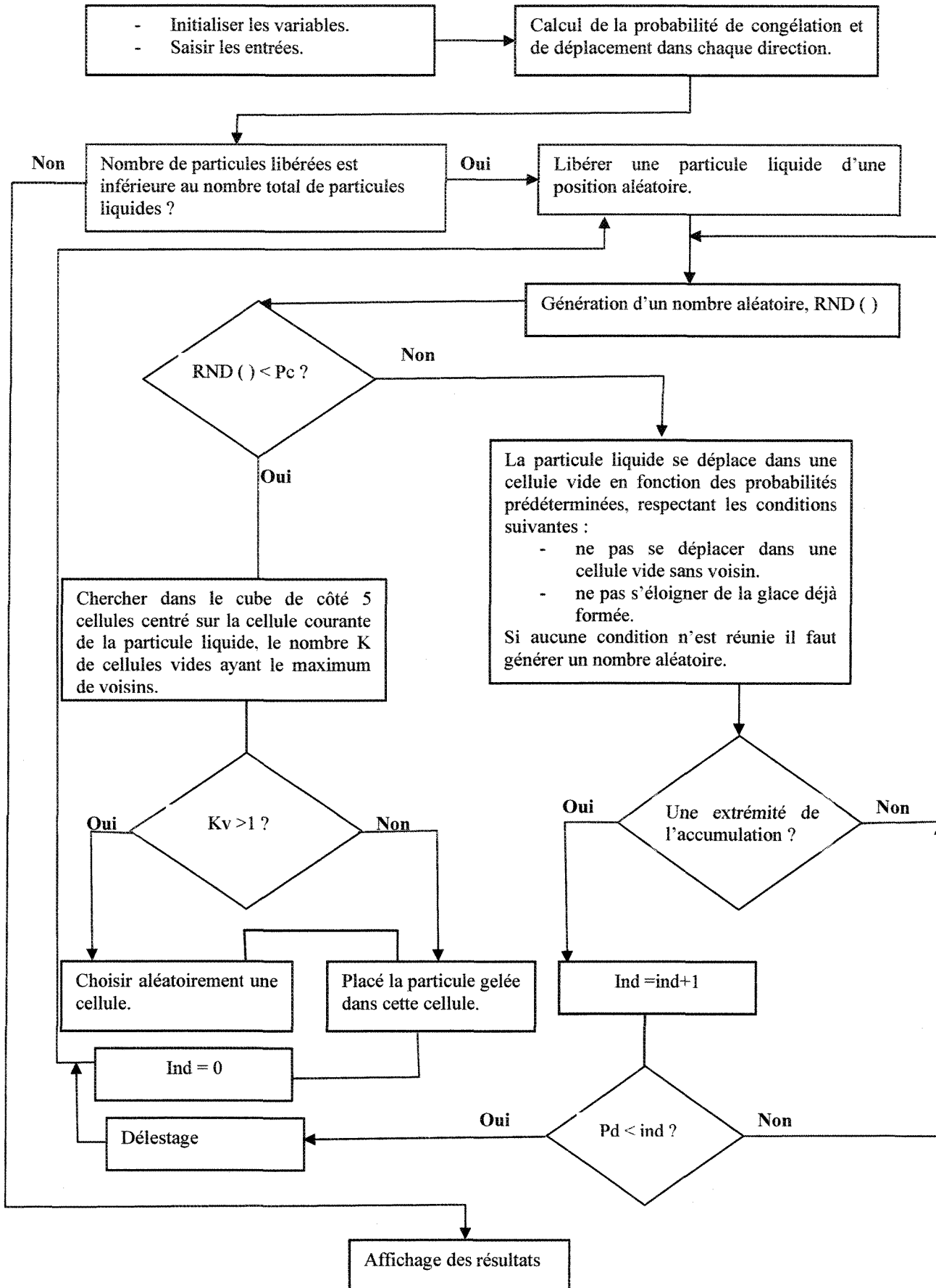
#### Principaux conducteurs utilisés par Hydro-Québec

Nom	Type et nombre de brins (Alu/Acier)	Diamètre (mm)	Massa 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	35,6	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 4

94



## **Annexe 5**





















## Annexe 5

```

C *****
***
C * Programme qui simule l'accumulation de glace sur un cylindre par la methode
*
C * du cheminement aleatoire ecrit par Elie Berenger LEBATTO, 2004
*
C * *****
***

Program randomwalk3D
implicit none

real ran2, rn, pc, pxl, pxr, pkf, pkb, pyd, VT, pi, rowater, Lf, deltat, il, jl,
&deltax, r, mcr, pm, anglephi, anglebeta, convht, precip, L,
&Numdropfreeze, numdropimp

integer i, j, k, z, c1(1:35), c2(1:35), ln, ci, cj, ck, idum, n, timeofsim,
&tt, Numofdrop, pd, sh, mn, res1, res2, res3, res4, res5, total, aran
character A(200,150,200)
Data(( (A(j,i,k), j=1,200), i=1,150), k=1,200) / 6000000*'9'/
Data(c1(i), i=1,35) / 48,45,43,41,40,39,38,37,37,36,36,35,35,35,34,34
&,34,34,34,34,34,35,35,35,36,36,37,37,38,39,40,41,43,45,48/
Data(c2(i), i=1,35) / 7,13,17,21,23,25,27,29,29,31,31,33,33,33,35,35
&,35,35,35,35,35,33,33,33,31,31,29,29,27,25,23,21,17,13,7/

integer length(200)

open (unit=1, file="drop10000x.txt", status='unknown')
open (unit=2, file="drop10000y.txt", status='unknown')
open (unit=3, file="drop10000k.txt", status='unknown')
open (unit=4, file="drop20000x.txt", status='unknown')
open (unit=5, file="drop20000y.txt", status='unknown')
open (unit=6, file="drop20000k.txt", status='unknown')
open (unit=7, file="drop30000x.txt", status='unknown')
open (unit=8, file="drop30000y.txt", status='unknown')
open (unit=9, file="drop30000k.txt", status='unknown')
open (unit=10, file="drop40000x.txt", status='unknown')
open (unit=11, file="drop40000y.txt", status='unknown')
open (unit=12, file="drop40000k.txt", status='unknown')
open (unit=13, file="drop50000x.txt", status='unknown')
open (unit=14, file="drop50000y.txt", status='unknown')
open (unit=15, file="drop50000k.txt", status='unknown')
open (unit=16, file="cylindrex.txt", status='unknown')
open (unit=17, file="cylindrey.txt", status='unknown')
open (unit=18, file="cylindrekt.txt", status='unknown')
open (unit=19, file="resultat.txt", status='unknown')

C CONSTRUCTION DU CYLINDRE
j=56
do i=1,35
  do ln=1,c2(i)
    do k=1,200
      A(j,c1(i),k)='c'
    enddo
    c1(i)=c1(i)+1
  enddo
  j=j+1
enddo

do k=1,200
  length(k)=90
enddo

```

```

pi=3.1415926 ! nombre pi
rowater=1000 ! masse volumique de l'eau en kg/m3

Lf=334400 ! chaleur de fusion de l'eau en joule par kg
deltat=0.1 ! pas de temps en seconde
deltax=0.0001 ! cote en metre de chaque cube du domaine
mcr=0.0032 ! masse critique de delestage
r=0.0175 ! rayon du cylindre
total=0
tt=0
numdropimp=0
Numdropfreeze=0
res1=0
res2=0
res3=0
res4=0
res5=0
pm=0.193 !probabilite de mouvement
VT=9.65-10.3*exp(-0.6) !calcul de la vitesse terminal des gouttelettes

c    les entrees du programme

c    WRITE (*,*) "Entrer parametre de delestage:"
c    READ *,pd
c    pd=500

c    WRITE (*,*) "Duree du givrage:"
c    READ *,timeofsim
c    timeofsim=5.0

    WRITE (*,*) "Taux de precipitation mm/h:"
    READ *,precip
    precip=precip/3.6D6 !precipitation en metre par seconde

!    Choix de l'angle d'inclinaison du cylindre

    write(*,*) "Entrer en degre l'angle d'inclinaison du conducteur:"
    read *,anglebeta !angle en degre

    write(*,*) "Entrer en degre l'angle d'impact:"
    read *, anglephi

    write(*,*) "Flux de chaleur:"
    read *,convht

    WRITE (*,*) "entrer un nombre entier negatif :"
    READ *,idum

c    nombre de gouttelettes

    if(anglephi.eq.0.0)then
        Numofdrop=int(timeofsim*precip*3.6D6*101.0*200)
    else
        Numofdrop=int(timeofsim*precip*3.6D6*120.0*200)
    endif

c    calcul de la probabilite de congelation et dans chacune des directions
    call pbcongelation(r,precip,rowater,lf,pi,convht,pm,pc,L)

```

```

Pkf=pm*sind(anglebeta)
Pkb=pm*(2-sind(anglebeta)+cosd(anglephi)-sind(anglebeta)*
&cosd(anglephi))
Pyd=pm*cosd(anglephi)*sind(anglebeta)
Pxl=pm*(3+sind(anglephi)-cosd(anglephi))/2.0
Pxr=pm*(3-sind(anglephi)-cosd(anglephi))/2.0

3   Sh=0
    tt=tt+1

    if(tt.le.Numofdrop)then
      if(anglephi.eq.0.0)then
        i=int(ran2(idum)*101.0)+1
        k=int(ran2(idum)*200.0)+1
        j=1
20    call move(j,i,k,A,n)
        if(n.ge.1) then
          A(j,i,k)='1'
          numdropimp=numdropimp+1.0
        else
          j=j+1
          if(j.gt.200) then
            goto 3
          endif
          goto 20
        endif
      else
        aran=int(ran2(idum)*120.0+1.0)
        k=int(ran2(idum)*200.0+1.0)
        i1=50.5+52.5*sind(anglephi)-cosd(anglephi)*(50-aran)
        j1=72.5-52.5*cosd(anglephi)-sind(anglephi)*(50-aran)
        i=int(i1+1)
        j=int(j1+1)
25    call move(j,i,k,A,n)
        if(n.ge.1)then
          A(j,i,k)='1'
          numdropimp=numdropimp+1.0
        else
          A(j,i,k)='9'
          j1=j1+cosd(anglephi)
          i1=i1-sind(anglephi)
          j=int(j1+1)
          i=int(i1+1)
          if((i.lt.1).or.(j.gt.200))then
            goto 3
          endif
          goto 25
        endif
      endif
    endif

35  if(Sh.ge.pd)then
      A(j,i,k)='9'
      goto 3
    endif

c    generation d'un nombre aleatoire pour decider du prochain mouvement
c    de la gouttelette d'eau
c    if(tt.gt.Numofdrop)then
c      goto 60
c    endif

40  rn=ran2(idum)

```

```

if(rn.le.pc)then
  if((i.lt.3).or.(j.lt.3).or.(k.lt.3).or.(i.gt.147).or.
&(j.gt.197).or.(k.gt.197))then
    goto 40
  endif
  call congelation(A,j,i,k,cj,ci,ck)
  A(j,i,k)='9'
  Numdropfreeze=Numdropfreeze+1.0

  if(Numdropfreeze.le.10000)then
    A(cj,ci,ck)='2'
    if (cj.gt.length(ck))then
      length(ck)=cj
    endif
    res1=res1+1
    write (2,*) j
    write (1,*) i
    write (3,*) k
  elseif(Numdropfreeze.le.20000)then
    A(cj,ci,ck)='3'
    if (cj.gt.length(ck))then
      length(ck)=cj
    endif
    res2=res2+1
    write (5,*) j
    write (4,*) i
    write (6,*) k
  elseif(Numdropfreeze.le.30000)then
    A(cj,ci,ck)='4'
    if (cj.gt.length(ck))then
      length(ck)=cj
    endif
    res3=res3+1
    write (8,*) j
    write (7,*) i
    write (9,*) k
  elseif(Numdropfreeze.le.40000)then
    A(cj,ci,ck)='5'
    if (cj.gt.length(ck))then
      length(ck)=cj
    endif
    res4=res4+1
    write (11,*) j
    write (10,*) i
    write (12,*) k
  else
    A(cj,ci,ck)='6'
    if (cj.gt.length(ck))then
      length(ck)=cj
    endif
    res5=res5+1
    write (14,*) j
    write (13,*) i
    write (15,*) k
  endif
  goto 3

elseif(rn.le.(pc+pxl))then
  i=i-1
  if(i.lt.1)then
    i=i+1
    goto 40
  endif
  call move(j,i,k,A,n)

```

```

        if(n.eq.0.or.A(j,i,k).eq.'c'.or.A(j,i,k).eq.'2'.or.A(j,i,k).eq.
&'3'.or.A(j,i,k).eq.'4'.or.A(j,i,k).eq.'5'.or.A(j,i,k).eq.'6')then
            i=i+1
            goto 40
        else
            A(j,i+1,k)='9'
            A(j,i,k)='1'
            if((j.gt.73).and.A(j+1,i,k).eq.'9')then
c                call move1(j+1,i,k,A,n)
c                if(n.eq.0) then
                    sh=sh+1
                    goto 35
c            endif
            endif
            goto 35
        endif

    elseif(rn.le.(pc+pxl+pxr))then
        i=i+1
        if(i.gt.150)then
            i=i-1
            goto 40
        endif
        call move(j,i,k,A,n)
        if(n.eq.0.or.A(j,i,k).eq.'c'.or.A(j,i,k).eq.'2'.or.A(j,i,k).eq.
&'3'.or.A(j,i,k).eq.'4'.or.A(j,i,k).eq.'5'.or.A(j,i,k).eq.'6')then
            i=i-1
            goto 40
        else
            A(j,i-1,k)='9'
            A(j,i,k)='1'
            if((j.gt.73).and.A(j+1,i,k).eq.'9')then
c                call move1(j+1,i,k,A,n)
c                if(n.eq.0) then
                    sh=sh+1
                    goto 35
c            endif
            endif
            goto 35
        endif

    elseif(rn.le.(pc+pxl+pxr+pkb))then
        k=k-1
        if(k.lt.1)then
c            k=k+1
            z=200
            call move(j,i,z,A,n)
            if(n.eq.0.or.A(j,i,z).eq.'c'.or.A(j,i,z).eq.'2'.or.A(j,i,z).eq.
&.'3'.or.A(j,i,z).eq.'4'.or.A(j,i,z).eq.'5'.or.A(j,i,z).eq.'6')then
                k=k+1
                goto 40
            else
                A(j,i,k+1)='9'
                k=z
                A(j,i,k)='1'
                if((j.gt.73).and.A(j+1,i,k).eq.'9')then
c                    call move1(j+1,i,k,A,n)
c                    if(n.eq.0) then
                        sh=sh+1
                        goto 35
c                endif
            endif
            goto 35
        endif
    endif
else

```



```

        call move(j,i,k,A,n)
        if(n.eq.0.or.A(j,i,k).eq.'c'.or.A(j,i,k).eq.'2'.or.A(j,i,k).eq.
&'3'.or.A(j,i,k).eq.'4'.or.A(j,i,k).eq.'5'.or.A(j,i,k).eq.'6')then
            k=k+1
            goto 40
        else
            A(j,i,k+1)='9'
            A(j,i,k)='1'
            if((j.gt.73).and.A(j+1,i,k).eq.'9')then
                call move1(j+1,i,k,A,n)
                if(n.eq.0) then
                    sh=sh+1
                    goto 35
                endif
            endif
            goto 35
        endif
    endif
endif

elseif(rn.le.(pc+pxl+pxr+pkb+pkf))then
    k=k+1
    if(k.gt.200)then
        k=k-1
        z=1
        call move(j,i,z,A,n)
        if(n.eq.0.or.A(j,i,z).eq.'c'.or.A(j,i,z).eq.'2'.or.A(j,i,z).eq.
&'3'.or.A(j,i,z).eq.'4'.or.A(j,i,z).eq.'5'.or.A(j,i,z).eq.'6')then
            k=k-1
            goto 40
        else
            A(j,i,k-1)='9'
            k=z
            A(j,i,k)='1'
            if((j.gt.73).and.A(j+1,i,k).eq.'9')then
                call move1(j+1,i,k,A,n)
                if(n.eq.0) then
                    sh=sh+1
                    goto 35
                endif
            endif
            goto 35
        endif
    else
        call move(j,i,k,A,n)
        if(n.eq.0.or.A(j,i,k).eq.'c'.or.A(j,i,k).eq.'2'.or.A(j,i,k).eq.
&'3'.or.A(j,i,k).eq.'4'.or.A(j,i,k).eq.'5'.or.A(j,i,k).eq.'6')then
            k=k-1
            goto 40
        else
            A(j,i,k-1)='9'
            A(j,i,k)='1'
            if((j.gt.73).and.A(j+1,i,k).eq.'9')then
                call move1(j+1,i,k,A,n)
                if(n.eq.0) then
                    sh=sh+1
                    goto 35
                endif
            endif
            goto 35
        endif
    endif
endif
endif

else
    j=j+1
    if(j.gt.200)then

```

```

        j=j-1
        goto 40
    endif
    call move(j,i,k,A,n)
    if(n.eq.0.or.A(j,i,k).eq.'c'.or.A(j,i,k).eq.'2'.or.A(j,i,k).eq.
&'3'.or.A(j,i,k).eq.'4'.or.A(j,i,k).eq.'5'.or.A(j,i,k).eq.'6')then
        j=j-1
        goto 40
    else
        A(j-1,i,k)='9'
        A(j,i,k)='1'
        if((j.gt.73).and.A(j+1,i,k).eq.'9')then
c          call move1(j+1,i,k,A,n)
c          if(n.eq.0) then
c              sh=sh+1
c              goto 35
        endif
        endif
        goto 35
    endif
endif
endif
total=0
do j=1,200
    do i=1,150
        do k=1,200
            if (A(j,i,k).eq.'2'.or.A(j,i,k).eq.'3'.or.A(j,i,k).eq.'4'
&.or.A(j,i,k).eq.'5'.or.A(j,i,k).eq.'6')then
                total=total+1
            endif
        enddo
    enddo
enddo

```

```

60  WRITE (19,*) "Resultat:"

```

```

WRITE (19,*) "Duree du givrage:",timeofsim

```

```

WRITE (19,*) "Taux de precipitation m/h:",precip

```

```

WRITE (19,*) "Probabilite de congelation:",PC

```

```

WRITE (19,*) "Pyd:",Pyd

```

```

WRITE (19,*) "Pkf:",Pkf

```

```

WRITE (19,*) "Pkb:",Pkb

```

```

WRITE (19,*) "Pxl:",Pxl

```

```

WRITE (19,*) "Pxr:",Pxr

```

```

WRITE (19,*) "taux de precipitation en mm/h:",precip*3.6D6

```

```

WRITE (19,*) "flux de chaleur:",convht

```

```

WRITE (19,*) "angle d'impact:",anglephi

```

```

WRITE (19,*) "angle d'inclinaison du cable:",anglebeta

```

```

WRITE (19,*) "nombre de gouttelettes geles:",Numdropfreeze

```

```

WRITE (19,*) "nombre total de gouttelettes:",Numofdrop

```

```

WRITE (19,*) "nombre de gouttelettes interceptees:",numdropimp

```

```
WRITE (19,*) "interceptees/gelees:", (Numdropfreeze/numdropimp)*100
```

```
write (19,*) "Res1:", Res1
write (19,*) "Res2:", Res2
write (19,*) "Res3:", Res3
write (19,*) "Res4:", Res4
write (19,*) "Res5:", Res5
write (19,*) "total:", total
```

```
do k=1,200
  write (19,*) length(k)
enddo
```

```
close(unit=1)
close(unit=2)
close(unit=3)
close(unit=4)
close(unit=5)
close(unit=6)
close(unit=7)
close(unit=8)
close(unit=9)
close(unit=10)
close(unit=11)
close(unit=12)
close(unit=13)
close(unit=14)
close(unit=15)
close(unit=16)
close(unit=17)
close(unit=18)
close(unit=19)
```

```
end
```

c      Subroutine QUI CHERGE LE NOMBRE VOISINS IMMEDIATS

```
SUBROUTINE MOVE (j,i,k,A,n)
implicit none
integer i,j,k,ni,nj,nk,il,iu,jl,ju,kl,ku,n
character A(200,150,200)
n=0

il=max(1,i-1)
iu=min(150,i+1)
jl=max(1,j-1)
ju=min(200,j+1)
kl=max(1,k-1)
ku=min(200,k+1)
do nj=jl,ju
  do ni=il,iu
    do nk=kl,ku
      if (A(nj,ni,nk).eq.'c'.or.A(nj,ni,nk).eq.'2'.or.
&A(nj,ni,nk).eq.'3'.or.A(nj,ni,nk).eq.'4'.or.
&A(nj,ni,nk).eq.'5'.or.A(nj,ni,nk).eq.'6') then
        n=n+1
      endif
    enddo
  enddo
enddo
```

```

return
end

```

c      Subroutine QUI CHERGE La cellule courante est la derniere dans son voisinage im  
mediat

```

SUBROUTINE MOVE1 (j,i,k,A,n)
implicit none
integer i,j,k,ni,nk,il,iu,kl,ku,n
character A(200,150,200)
n=0

il=max(1,i-1)
iu=min(150,i+1)
kl=max(1,k-1)
ku=min(200,k+1)
do ni=il,iu
  do nk=kl,ku
    if (A(j,ni,nk).eq.'c'.or.A(j,ni,nk).eq.'2'.or.
&A(j,ni,nk).eq.'3'.or.A(j,ni,nk).eq.'4'.or.
&A(j,ni,nk).eq.'5'.or.A(j,ni,nk).eq.'6') then
      n=n+1
    endif
  enddo
enddo
return
end

!*****
! calcul de la probabilite de congelation *
!*****

subroutine pbcongelation(r,precip,rowater,lf,pi,convht,pm,pc,L)
implicit none
real rr,rowater,r,lf,convht,pm,pi,pc,L,precip

!pc=pi*convht-95.448)*0.001*pm/(2.0*r*precipitation*row*Lf)
!L(precipitation*row*r*Lf)/(convht-95.448)

pc=pi*convht*0.001*pm/(2.0*r*precip*rowater*Lf)
L=(precip*rowater*r*Lf)/convht
pm=(1-pc)/5
return
end

```

c      Looking for the cradle location

```

subroutine congelation(A,j,i,k,cj,ci,ck)
implicit none
integer i,j,k,ci,cj,ck,mn,n,idum,loc,tip,
&VOISINAGE(-2:2,-2:2,-2:2),MAXVOISIN(125,3)
real ran2
character A(200,150,200)

mn=0

if (i.ge.3.and.j.ge.3.and.k.ge.3.and.i.le.147.and.j.le.197.and.
&k.le.197) then
  do cj=j-2,j+2
    do ci=i-2,i+2
      do ck=k-2,k+2
        if (A(cj,ci,ck).eq.'c'.or.A(cj,ci,ck).eq.'2'.or.
&A(cj,ci,ck).eq.'3'.or.A(cj,ci,ck).eq.'4'.or.

```

```

&A(cj,ci,ck).eq.'5'.or.A(cj,ci,ck).eq.'6')then
  voisinage(cj-j,ci-i,ck-k)=-1
else
  call move(cj,ci,ck,A,n)
  voisinage(cj-j,ci-i,ck-k)=n
  if(n.ge.mn)then
    mn=n
  endif
endif
enddo
enddo
enddo
loc=0
do cj=j-2,j+2
  do ci=i-2,i+2
    do ck=k-2,k+2
      if(voisinage(cj-j,ci-i,ck-k).eq.mn) then
        loc=loc+1
        maxvoisin(loc,1)=cj
        maxvoisin(loc,2)=ci
        maxvoisin(loc,3)=ck
      endif
    enddo
  enddo
enddo
if(loc.eq.1)then
  cj=maxvoisin(loc,1)
  ci=maxvoisin(loc,2)
  ck=maxvoisin(loc,3)
else
  loc=int(ran2(idum)*loc+1)
  cj=maxvoisin(loc,1)
  ci=maxvoisin(loc,2)
  ck=maxvoisin(loc,3)
endif
endif
return
end

```

```

!*****
**!
!           generating a random number
!
!*****
**!

```

```

function ran2(idum)
integer idum,im1,im2,imm1,ia1,ia2,iq1,iq2,ir1,ir2,ntab,ndiv
real ran2,am,eps,rnmix
parameter (im1=2147483563,im2=2147483399,am=1./im1,imm1=im1-1)
parameter (ia1=40014,ia2=40692,iq1=53668,iq2=52774,ir1=12211)
parameter (ir2=3791,ntab=32,ndiv=1+imm1/ntab,eps=1.2e-7,
1rnmix=1.-eps)

```

```

integer idum2,j,k,iv(ntab),iy
save iv,iy,idum2
data idum2/123456789/,iv/ntab*0/,iy/0/
if (idum.le.0) then
  idum=max(-idum,1)
  idum2=idum
  do j=ntab+8,1,-1

```

```

      k=idum/iq1
      idum=ia1*(idum-k*iq1)-k*ir1
      if (idum.lt.0) idum=idum+im1
      if (j.le.ntab) iv(j)=idum
    enddo
    iy=iv(1)
  endif
  k=idum/iq1
  idum=ia1*(idum-k*iq1)-k*ir1

  if (idum.lt.0) idum=idum+im1
  k=idum2/iq2
  idum2=ia2*(idum2-k*iq2)-k*ir2

  if (idum2.lt.0) idum2=idum2+im2
  j=1+iy/ndiv
  iy=iv(j)-idum2
  iv(j)=idum

  if (iy.lt.1) iy=iy+imm1
  ran2=min(am*iy,rnmix)
  return
end

```