

# TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION .....	1
1.1) Description générale des types de précipitations.....	1
1.2) La problématique.....	5
1.3) Objectifs.....	7
1.4) L'originalité de cette recherche.....	8
1.5) Méthodologie.....	9
TRAVAUX ANTERIEURS SUR LA NEIGE COLLANTE.....	11
2.1) L'accrétion de neige .....	11
2.1.1) Les types d'accrétion.....	11
2.1.2) Les formes d'accrétion .....	13
2.2) Physique de la neige collante.....	15
2.2.1) La teneur en eau liquide de la neige collante.....	16
2.2.2) Les régimes de la saturation en eau liquide.....	18
A. <i>La neige collante en régime pendulaire</i> .....	19
B. <i>La neige collante en régime funiculaire</i> .....	22
2.2.3) L'adhésion .....	24
2.3) Observation dans la nature .....	27
2.3.1) Pendant l'accumulation .....	27
2.3.2) Pendant le délestage.....	30
2.4) Simulation expérimentales .....	32

2.4.1) De l'accumulation.....	32
2.4.2) Du délestage .....	34
2.5) Les modèles existants d'accumulation et de délestage de neige .....	37
2.5.1) Modèle d'accumulation de neige de Grenier, Admirat (1986), Sakamoto (2000), Poots et Skelton (1994) .....	37
2.5.2) Le modèle numérique de Roberge (2006) .....	39
EXPERIMENTATION.....	40
3.1) Installations de l'expérience .....	41
3.2) Fabrication de la douille de neige collante .....	44
3.3) Mesure de la teneur en eau liquide à l'aide d'un calorimètre.....	47
3.3.1) Calibration du calorimètre .....	47
3.3.2) Mesure de la teneur en eau liquide d'un échantillon de neige .....	50
3.3.3) Analyse d'erreur de la mesure de la LWC .....	52
MODÈLE THÉORIQUE.....	54
4.1) Bilan de chaleur .....	56
4.2) La percolation de l'eau .....	63
4.3) Changement de géométrie .....	65
4.4) Calcul de la LWC .....	70
4.4.1) Calcul des masses de la neige dans la partie supérieure et inférieure .....	71
4.4.2) Calcul des masses d'eau dans la partie supérieure et inférieure .....	73
RESULTATS ET DISCUSSION .....	75
5.1) Mécanisme du délestage.....	76
5.2) Résultats expérimentaux.....	79
5.2.1) Influence de la température .....	80

5.2.2) Influence de la vitesse du vent.....	82
5.2.3) Influence du rayonnement .....	83
5.2.4) Influence du courant électrique .....	85
5.3) Comparaison entre les expériences et le modèle théorique.....	86
5.3.1) Estimation de la LWC .....	87
5.3.2) Estimation de la densité.....	92
5.3.3) Estimation de la masse d'eau et de la masse totale dans la douille de neige	95
5.3.4) Estimation de la quantité de chaleur.....	97
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	101
6.1 Conclusions.....	102
6.2 Recommandations.....	104
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	106
Annexe 1 .....	111
Annexe 2 .....	114
Annexe 3 .....	131
Annexe 4 :.....	133
Annexe 5 .....	138

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Différents types de cristaux de neige fraîche : aiguilles, étoile, plaquettes.....	3
Figure 2: Précipitation de neige en France .....	5
Figure 3 : Croissance axiale sur un câble (tirée de Sakamoto 2000) .....	14
Figure 4 : Formation d'une douille cylindrique (tirée de Sakamoto 2000) .....	15
Figure 5 : Neige collante en régime pendulaire (a) et funiculaire (b).....	19
Figure 6 : Regroupement de grains en régime pendulaire. ....	20
Figure 7 : Surface de contact entre les grains de glace. ....	21
Figure 8 : Pression capillaire en fonction de la saturation .....	23
Figure 9 : Grains de neige collante en régime funiculaire .....	24
Figure 10 : Force capillaire .....	26
Figure 11 : Accumulation de neige collante en Savoie.....	30
Figure 12 : Les étapes jusqu'au délestage.....	31
Figure 13 : Équipement d'une soufflerie pour reproduire une accréation de neige collante .....	33
Figure 14 : Les matériaux nécessaires a la fabrication de la douille .....	41
Figure 15 : Utilisation des lampes halogènes .....	42
Figure 16 : Génératrice (source 3500 Ampères AC) .....	43
Figure 17 : Connexion entre le câble et la génératrice.....	44
Figure 18 : Compression de la neige afin d'obtenir une douille cylindrique.....	45
Figure 19 : Installation des expériences à la CIGELE. ....	46

Figure 20 : Accumulation en laboratoire à la CIGELE .....	46
Figure 21 : bilan de chaleur sur un manchon de neige humide .....	56
Figure 22 : Surface du câble selon y :.....	68
Figure 23 : agrandissement dans le cas pour : $r_{-rc} < y < r$ .....	69
Figure 24 : Description du modèle.....	71
Figure 25 : Évolution d'une douille de neige (expérience à 5°C et un vent de 2 m/s)....	78
Figure 26 : Variation de la LWC en fonction de la température .....	81
Figure 27 : Variation de la LWC en fonction de la vitesse du vent.....	83
Figure 28 : Variation de la LWC en fonction de la luminosité.....	84
Figure 29 : Variation de la LWC selon le courant électrique .....	86
Figure 30 : Température à 3°C et une lampe à 450 lux.....	88
Figure 31 : Température à 3°C et un vent de 2 m/s.....	89
Figure 32 : Température à 3°C.....	90
Figure 33 : Température à 2°C et un courant de 100 Ampères.....	91
Figure 34 : Température à 2°C et un courant de 50 Ampères.....	91
Figure 35 : Variation de la densité de la neige ( $T = 5\text{ °C}$ ) .....	93
Figure 36 : Variation de la densité de la neige ( $T = 2\text{ °C}$ et $I = 100\text{ A}$ ).....	93
Figure 37 : Variation de la densité ( $T = 3\text{ °C}$ et vent de 2 m/s) .....	94
Figure 38 : Température à 3°C.....	95
Figure 39 : Température à 5°C et un courant de 50 Ampères.....	96
Figure 40 : Température à 3°C et une lampe. ....	96
Figure 41 : Quantité de chaleur fournie par convection selon la température de l'air....	98
Figure 42 : Quantité de chaleur fournie par convection selon de la vitesse du vent.....	99

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Densité, vitesse du vent et surcharge de la neige en France, Japon et Islande .....	29
Tableau 2 : Calcul d'erreur de chaque paramètre .....	52
Tableau 3 : Rôle de la température .....	81
Tableau 4 : Rôle de la vitesse du vent.....	82
Tableau 5 : Rôle de l'intensité lumineuse.....	84
Tableau 6 : Rôle du courant électrique .....	85
Tableau 7 : Quantité de chaleur par convection.....	98
Tableau 8 : Quantité de chaleur par rayonnement à onde courte.....	100
Tableau 9 : Quantité de chaleur par effet de Joule.....	100

# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

### **1.1) Description générale des types de précipitations**

Dans certains pays au climat froid et dans les régions montagneuses du monde, le givrage peut représenter un problème majeur sur les structures ce qui peut, en certains cas, causer leur effondrement. Le phénomène de givrage est un terme générique pour tous les types d'accrétions, appartenant généralement à deux catégories principales: les précipitations givrantes, et le givrage par brouillard (Farzaneh, 2008 et Makkonen, 2000). Les précipitations givrantes peuvent produire du verglas, de la neige mouillée ou de la neige sèche. L'apparition de ces précipitations givrantes dépend de la variation de la température à la surface et à plusieurs mètres d'altitudes. Par contre, le givrage par brouillard se trouve dans les nuages qui sont composés de gouttelettes surfondues à des températures inférieures au point de solidification.

- Le givre

Le givre se produit au contact des gouttelettes d'eau avec l'objet de glaçage, qui se trouve généralement à des températures inférieures à  $-5^{\circ}\text{C}$ . Lorsque la chaleur latente de solidification devient suffisante, 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.

- Le gel

L'apparition du gel s'effectue lorsque la vapeur d'eau contenue dans l'air se sublime sur un substrat dont la température chute sous la température de solidification de l'eau. Cependant, le gel reste un phénomène peu important en ce qui a trait au givrage, à cause de son faible pouvoir adhésif et de son faible poids.

- Le verglas

Le phénomène de verglas se produit 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. Par le fait même, 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 pour former de la glace spongieuse ou s'écouler sous l'effet des forces aérodynamiques. Ce phénomène est dû à une pluie en surfusion, aussi appelée pluie verglaçante. L'accrétion s'effectue à une température avoisinant la température de solidification de l'eau qui est de 0 °C à la pression atmosphérique.

- La neige sèche

La neige sèche se produit à des températures inférieures au point de solidification de l'eau. Étant peu adhésif, la neige sèche peut s'accumuler avec la présence de vents faible ( $< 2$  m/s), mais elle représente rarement un véritable danger pour les structures.

- La neige mouillée

Au moment où la température de l'air se retrouve juste au dessus de la température de solidification de l'eau, les flocons de neige (voir figure 1) qui heurtent la surface de l'objet ou de la glace qui le recouvre vont s'agglomérer sur celui-ci sous l'effet des forces aérodynamiques et ainsi former une grande charge de neige. Le degré d'adhésion de la neige se retrouve corollaire des conditions météorologiques.

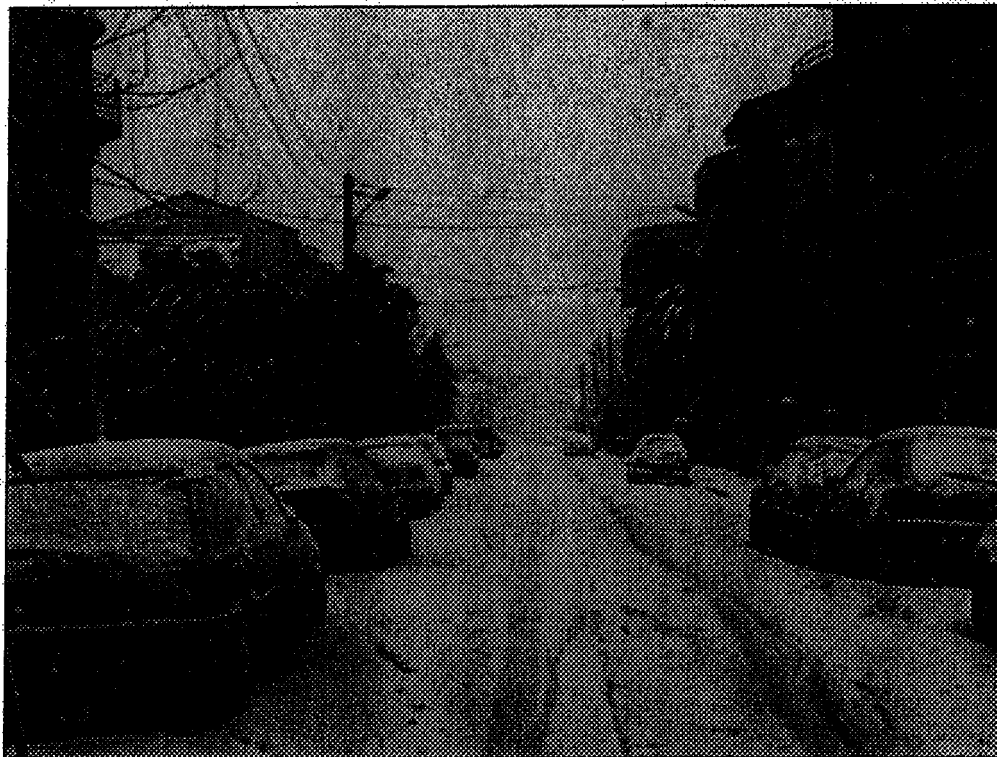


**Figure 1 : Différents types de cristaux de neige fraîche : aiguilles, étoile, plaquettes.**

Photographie Météo France/CEN/Edmond Pahaut.

En règle générale, l'accumulation de glace se produit lorsque les gouttelettes d'eau liquide, ayant une température légèrement inférieure à celle de l'air ambiant, entrent en contact avec la surface d'un objet ou se déposent sur l'accumulation qui se trouve déjà sur ce dernier, elles se solidifient après impact en raison de la surfusion et les dendrites de glace croissent rapidement en fonction du degré de surfusion (ordre du millième de seconde). Le degré de surfusion influence aussi la forme que prend la gouttelette d'eau en surfusion après l'impact. La solidification s'effectue à un taux déterminé par la quantité de chaleur latente de solidification qui peut être absorbée par l'air et par le substrat.

Cependant pour solidifier toute l'eau en surfusion avant l'arrivée d'une autre gouttelette au même endroit, il faut que cette chaleur latente de solidification soit suffisante. Sinon il peut se produire deux phénomènes, soit une certaine quantité d'eau liquide reste emprisonnée à l'intérieur de cette accumulation, soit cette quantité d'eau liquide s'écoule sous l'effet des forces aérodynamiques. La différence entre l'accrétion de neige collante avec celle de givrage réside principalement au fait que les flocons de neige collante possèdent un mélange des trois phases : la glace, l'air et l'eau. C'est également cette présence d'eau liquide qui accentue le pouvoir d'adhésion avec le câble et de la cohésion entre la neige.



**Figure 2: Précipitation de neige en France**

## **1.2) La problématique**

Lorsqu'il y a une précipitation de neige, les particules de neige peuvent adhérer sur les objets exposés et notamment sur les câbles et conducteurs aériens : c'est ce qu'on appelle une accrétion ou une accumulation de neige (voir figure 2). Dans la nature, il existe une sorte de neige, la neige collante, qui possède une capacité à adhérer aux objets. L'accrétion de cette sorte de neige peut être très problématique et poser de nombreuses questions sur la fiabilité et la sécurité des structures. En particulier, les câbles et les pylônes électriques peuvent être endommagés par une surcharge due à l'accumulation de neige collante, entraînant parfois des coupures de courant. De plus, les surcharges dynamiques produites par la chute de la neige accumulée peuvent causer

de grandes oscillations et une fatigue pouvant aller jusqu'à la rupture des supports, à cause en majeure partie des efforts dissymétrique transmis par les câbles.

Donc, il existe un intérêt considérable à l'étude d'une accrétion de neige collante. Cependant, dans la pratique, les phénomènes d'accrétion sont très difficiles à observer puisqu'elles sont rares et souvent limiter à des régions particulières avec des conditions propres (Sakamoto, 2000). Le phénomène d'accrétion peut se produire sous une grande variété de combinaisons des paramètres météorologiques. De plus, l'accrétion de neige collante, telle que décrite par Colbeck et Ackley (1982), est particulièrement problématique à cause de la grande quantité de neige qui peut s'accumuler en quelques heures seulement.

Le sujet de cette recherche est l'établissement des critères de déclenchement du délestage sur des câbles aériens. Il est à noter que le délestage de la neige collante se réalise en plusieurs étapes. Dans un premier temps, les effets thermiques tels que la convection forcée, le rayonnement solaire et l'effet de Joule contribuent principalement à l'augmentation de la teneur en eau liquide (LWC) dans le manchon de neige. Ainsi, lorsque la LWC atteint d'assez hautes valeurs, les douilles de neige perdent leur cohésion et tombent naturellement quelques heures après leur accumulation sous l'effet de la pesanteur et du vent : c'est l'initiation du délestage, la première étape qui se produit sur l'extrémité de la douille pour une petite flèche, alors que pour une flèche plus grande, le délestage se produit au milieu de la douille. Ensuite, le délestage d'un morceau de la douille souvent provoque des vibrations qui entraînent le délestage des

morceaux adjacents dans la douille, c'est le phénomène ``unzipping``. Le sujet de cette recherche se concentrera essentiellement sur le premier pas du délestage, c'est-à-dire son initiation pour des câbles ayant un fléchissement négligeable.

### **1.3) Objectifs**

Cette recherche est une première étape de la compréhension du délestage de la neige collante sur des câbles aériens, en particulier sur l'initiation et la propagation. Le délestage d'une accumulation de neige collante cause un déséquilibre de poids sur la ligne aérienne. Par conséquent, la compréhension du délestage de la neige collante et de sa propagation est particulièrement importante du point de vue du design des supports des câbles. De plus, une condition essentielle à la formation accrétion de neige est la présence d'eau liquide, qui est un facteur responsable de l'adhésion avec le câble.

Ainsi, les principaux objectifs de la recherche proposée sont :

- établir un modèle thermodynamique en deux dimensions du déclenchement du délestage de neige collante des câbles électriques avec une petite flèche dans différentes conditions météorologiques et environnementales en variant : la température de l'air, la vitesse du vent, l'intensité lumineuse du rayonnement et le courant électrique dans le conducteur,

- déterminer les changements des caractéristiques de la neige, principalement trouver comment la teneur en eau liquide (LWC) varie jusqu'au déclenchement de la chute de la neige,
- déterminer la contribution des paramètres atmosphériques considérés et les critères essentiels au déclenchement du délestage de la neige collante.

#### **1.4) L'originalité de cette recherche**

Il existe très peu de documentations sur les conditions de délestage de la neige collante. Roberge (2006) a amorcé des travaux sur les conditions du délestage et sa propagation, afin d'obtenir certaines réponses sur les caractéristiques de la neige collante lors de son délestage : c'est-à-dire sa teneur en eau liquide (LWC), sa densité et son profil. Cependant, les expériences pratiques en laboratoire ont été effectuées sous des conditions météorologiques constantes. Or, il serait intéressant d'obtenir des changements sur la LWC, qui est un facteur décisif concernant le changement d'adhérence et la chute de neige (Admirat et al. 1988), la densité et le profil de la neige collante, en variant ces paramètres météorologiques.

Plusieurs modèles existent sur l'accumulation de neige collante, qui seront décrits dans le prochain chapitre. Ces modèles, basés sur les équations du bilan de chaleur, s'établissent pendant l'accumulation de neige collante. Le modèle réalisé lors de cette recherche est, aussi, basé sur le bilan de chaleur, mais lorsque l'accumulation de neige

est terminée. De plus, cette étude prendra en considération la radiation qui est négligée dans les autres modèles, puisque les conditions du délestage peuvent se produire avec un ciel ensoleillé. Une autre novation de cette recherche est la considération du transfert de l'eau dans la douille de neige, ainsi que l'estimation de la cavité sur l'extrémité de douille jusqu'au délestage.

### **1.5) Méthodologie**

Cette recherche se compose de deux parties : une partie expérimentale et une autre théorique, basée sur un modèle thermodynamique. Afin d'atteindre à nos objectifs, un protocole expérimental a été fait pour reproduire des douilles de neiges cylindriques. Les expériences n'ont pu être réalisées seulement en période hivernale, puisque la matière première, la neige, est abondante en cette période à Chicoutimi. Toutes les expériences ont été réalisées dans l'une des chambres froides de la CIGELE, où plusieurs paramètres ambiants peuvent être simulés. La température de la chambre est contrôlée, le vent est produit à l'aide d'une ventilation, des lampes halogènes sont utilisées pour simuler les rayonnements du soleil, et une génératrice a permis de produire un courant électrique dans le câble. Plusieurs séries d'expériences ont été établies selon des paramètres contrôlables : la température, la vitesse du vent, l'intensité lumineuse et le courant électrique.

La partie théorique doit être exprimée, en premier lieu, pour savoir comment agit la variation de la LWC, dans une section circulaire à la fin de douille, en considérant une flèche négligeable. Le modèle thermodynamique permet grâce aux équations de transfert de chaleur due aux différents paramètres atmosphériques de calculer la variation de la LWC jusqu'au délestage. Ensuite, la simulation se concentrera sur le transfert de masse de l'eau liquide qui se produit dans la douille de neige due à la gravité. En conclusion, avec les changements géométriques et la percolation, le modèle prédit les variations de la LWC dans les parties supérieures et inférieures de la douille de neige. Une comparaison est réalisée entre le modèle et les résultats expérimentaux.

## CHAPITRE 2

### TRAVAUX ANTERIEURS SUR LA NEIGE COLLANTE

Les connaissances sur la physique d'accrétion de la neige collante proviennent de plusieurs études et d'observations sur les mécanismes de croissance de neige dans la nature et en laboratoire, mais aussi sur le délestage. La plupart des littératures concernant le sujet ont été rédigées par les auteurs suivants Wakahama et al. 1997, Admirat et al. 1988, et Sakamoto 2000. En premier lieu, ce chapitre se consacre à présenter un rappel sur les différents types de neiges et formes d'accrétions, ainsi que sur la physique de la neige collante.

#### **2.1) L'accrétion de neige**

##### *2.1.1) Les types d'accrétion*

L'accumulation de neige est un type d'accrétion par précipitation (Sakamoto, 2000). Ce type de précipitation est causé par les flocons de neige, qui sont un mélange d'air, de

glace et d'eau, qui se heurtent sur la surface du câble ou sur la neige déjà accumulée. La plupart des littératures sur la physique d'accrétion de la neige collante viennent d'auteurs qui ont observés ou étudiés les mécanismes d'accumulation et de croissance de la neige dans la nature ou dans une soufflerie, tels que Wakahama et al. 1997, Admirat et al. 1988, et Sakamoto 2000. Dans la nature, il existe deux grandes familles de neige : la neige sèche et la neige collante.

#### *A) Accrétion de neige sèche*

L'accumulation de neige sèche se produit à des températures inférieures au point de congélation, avec des vents faibles en intensité, généralement inférieurs à 2 m/s. En outre, sa densité ( $< 0.1 \text{ g/cm}^3$ ) et ses forces adhésives sont généralement faibles et ne provoquent que rarement des charges mécaniques dangereuses. De plus, dans le cas d'une accrétion de neige sèche à de basses températures, la neige accumulée a tendance à tomber plus facilement en raison des vibrations produites par le vent, puisque le pouvoir adhésif est faible (Sakamoto, 2005).

#### *B) Accrétion de neige collante*

Par contre, l'accrétion de la neige collante se produit généralement à une température de l'air légèrement positive. Sa densité varie entre 0.1 et 0.95  $\text{g/cm}^3$ , (Admirat et al., 1990, Wakahama et al., 1977, Sakamoto et al., 2000 et Eliasson et Thorsteins 2000), selon la

vitesse du vent, car plus le vent est fort et plus la neige devient compacte, plus la densité augmente. Mais sa grande force d'adhésion sur les obstacles s'avère à être un inconvénient, en particulier sur les câbles aériens, ce qui peut provoquer des surcharges.

#### *2.1.2) Les formes d'accrétion*

La forme de la neige accumulée sur les fils aériens est dépendante de plusieurs facteurs : paramètres météorologiques tels que la température, l'humidité, la vitesse du vent et sa direction, et paramètres du conducteur tels que le matériel, la taille, les supports et la longueur (Sakamoto, 2000).

##### *A) Accrétion axiale*

Une croissance axiale se produit sur le côté du câble d'où provient le vent quand sa rotation est empêchée : vers la fin de la ligne, où la rigidité de la torsion est augmentée. Dans ce cas, l'accrétion de neige se développe simplement dans la direction du vent (voir figure 3).

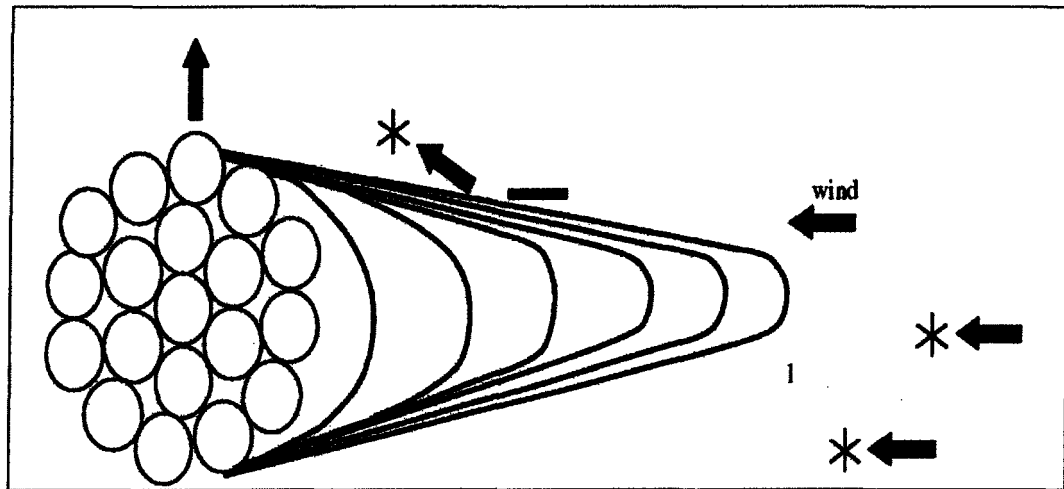
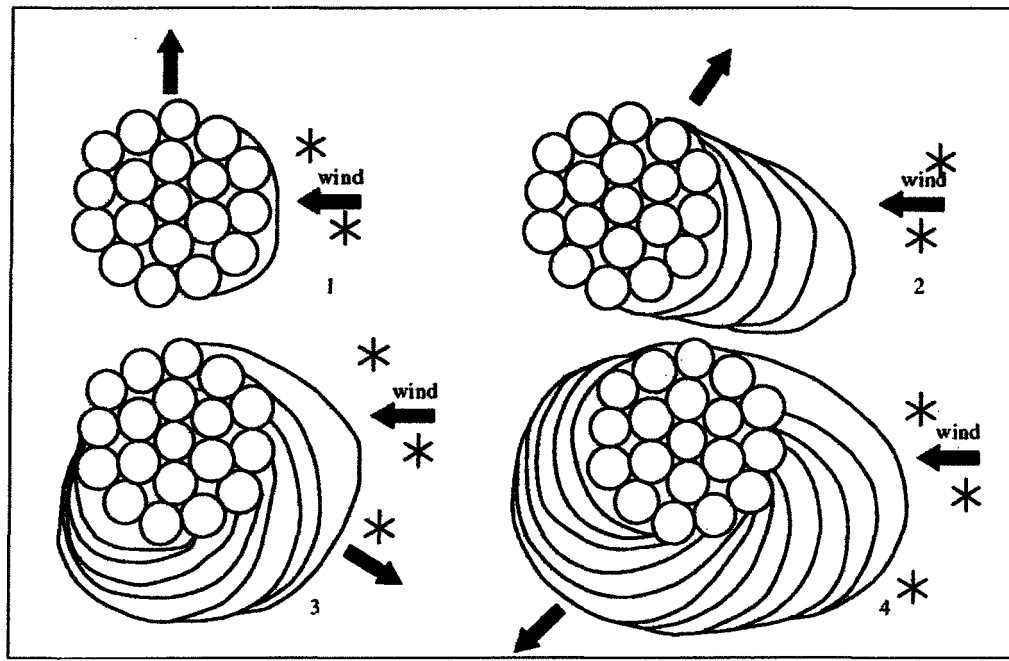


Figure 3 : Croissance axiale sur un câble (tirée de Sakamoto 2000)

#### B) Accrétion cylindrique

Wakahama et al. (1977) ont été les premiers à démontrer comment le vent pouvait construire une douille uniformément déposée autour d'un câble. Par exemple, lorsque la vitesse du vent est inférieure à 10 m/s, le dépôt de neige tourne autour du fil sous l'effet de la gravitation. Cependant, lorsqu'elle excède 10 m/s, la rotation de la neige est due parfois aux forces aérodynamiques.

Le processus de formation d'une douille cylindrique est résumé par Sakamoto (2000) : d'abord, il y a un empilage de la neige sur le fil. Ensuite, il y a une rotation du conducteur de l'ordre de 10 degrés, et ainsi de suite jusqu'à la formation de la douille cylindrique, tel que montré à la figure 4.



**Figure 4 : Formation d'une douille cylindrique (tirée de Sakamoto 2000)**

Dans le cas d'un câble ayant une faible rigidité de torsion (comme un fil aérien ou un conducteur monophasé), la douille cylindrique peut recouvrir pratiquement la totalité du câble (Poots, 1996 et Yukino, 2007).

## **2.2) Physique de la neige collante**

Colbeck et Denoth sont les auteurs qui ont le plus contribué à la compréhension de la physique de la neige collante. Leur recherche traite de l'évolution de la microstructure de la neige collante et de sa LWC.

Les propriétés physiques de la neige collante (densité, dimension des particules, structure) sont extrêmement variables, dépendamment des ratios des trois phases : la glace, l'eau et l'air. Elles changent rapidement en fonction de la température ambiante, du rayonnement solaire, et de la précipitation. La neige accumulée sur un câble comporte de nombreux pores, en particulier pour des densités faibles. Donc, l'eau et l'air peuvent passer à travers ces pores, favorisant la métamorphose de la neige et rendant les observations plus complexes (Sakamoto 2005).

#### *2.2.1) La teneur en eau liquide de la neige collante*

Une accrétion de neige est décrite, généralement, par la surcharge de neige (masse par unité de longueur). Cependant, deux autres variables relatives à la neige sont importantes : la densité, et la teneur en eau liquide (LWC, *liquid water content*, en anglais) qui influencent sur l'adhésion, et par conséquent sur la surcharge de neige.

D'abord, il n'y a pas une définition standard pour la LWC de la neige collante accumulée sur des câbles. La majorité des documentations sur le métamorphisme de la neige collante et son accrétion sur des câbles sont cohérentes, cependant le paramètre LWC est exprimé différemment d'un auteur à l'autre. En 1985, la LWC est définie comme le pourcentage d'eau liquide par volume de neige par un groupe de recherche, dirigé par S.C. Colbeck. Cette définition, aussi, utilisée par les chercheurs pour étudier les montagnes neigeuses et les avalanches, devient une norme internationale pour décrire la LWC des couches de neige.

*La teneur en eau liquide est exprimée comme un pourcentage par volume. Aujourd'hui, plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer la teneur en eau liquide : la calorimétrie chaude (fusion) et froide (congélation), de la dilution et les mesures diélectriques. L'eau liquide est mobile seulement si la teneur en eau irréductible est dépassé. La teneur en eau irréductible est d'environ 3% en volume et dépend beaucoup de la texture de la neige, taille des grains et de la forme des grains. Il s'agit l'eau qui peuvent être détenus par les forces de surface contre la force de gravité.*

(Traduction de Colbeck et Al. 1990).

Une classification de la neige créée par *the International Commission on Snow and Ice*, ce même groupe de recherche dirigé par S.C. Colbeck est résumé par la suite.

La neige sèche est normalement à une température inférieure à 0 °C, avec une LWC nulle et une faible capacité à adhérer. La neige humide est divisée en trois catégories : selon sa LWC. Pour des LWC < à 3%, l'eau n'est pas visible, même au grossissement de 10 fois au microscope. Alors que lorsque la LWC est comprise entre 3 et 8 %, l'eau peut être reconnue à un grossissement de 10 fois au microscope, et on parle de régime pendulaire. Pour des LWC entre 8 et 15 %, on parle de régime funiculaire, en plus de l'eau, il y a une quantité d'air à l'intérieure des pores. Enfin, pour des LWC qui dépassent les 15 %, on parle de neige fondante, qui est inondée d'eau et une faible quantité d'air.

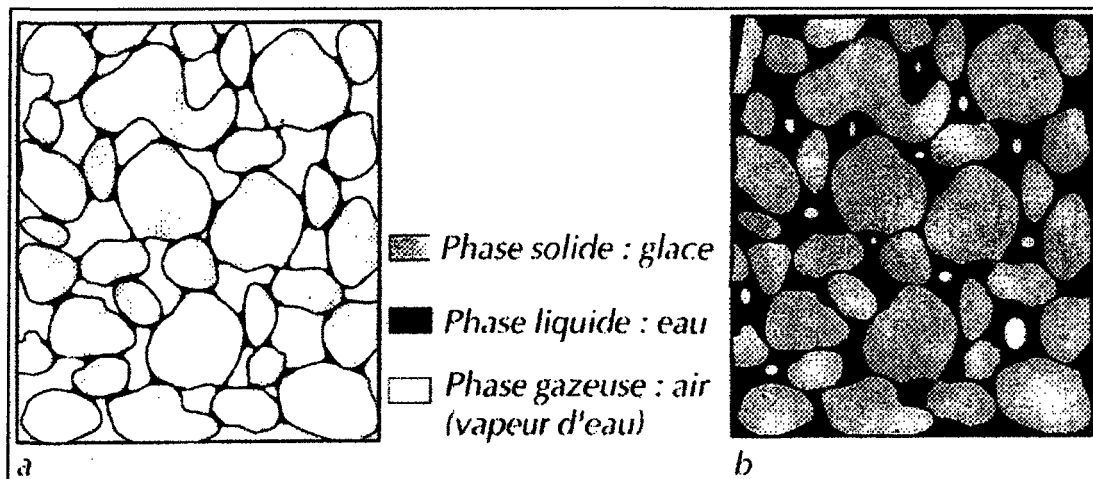
D'autres auteurs définissent la LWC comme la masse d'eau liquide divisée par la masse totale de la neige collante, comme Sakamoto (2000, 2005), Admirat (1986, 1988, 1990),

Poots (1996) et Wakahama (1977, 1979). Dans le cadre de cette recherche, la LWC est définie de cette manière. De plus, la LWC peut aussi être définie comme la masse d'eau par unité de volume du solide ( $\text{g/m}^3$ ). En général, cette définition de la LWC est utilisée pour les autres types de givrage que la neige.

Denoth (1982) définit la saturation comme le rapport de la LWC massique de la neige à sa porosité, cette variable permet une meilleure représentation de l'eau dans la neige. En fait, il définit la quantité de saturation d'eau (en %) comme la mesure à laquelle l'eau liquide peut remplir les pores, les espaces vides dans le volume de neige.

#### *2.2.2) Les régimes de la saturation en eau liquide*

La neige collante a deux régimes pour la saturation en eau liquide : le pendulaire et le funiculaire. Pour des valeurs basses de la LWC (Fig.5a), la neige est dite en régime pendulaire, et l'air est en continu à travers les pores. Alors que pour de hautes valeurs de la LWC, on parle de régime funiculaire (Fig.5b), et on retrouve l'eau en continu.



**Figure 5 : Neige collante en régime pendulaire (a) et funiculaire (b)**  
(C. Ancey, 1998)

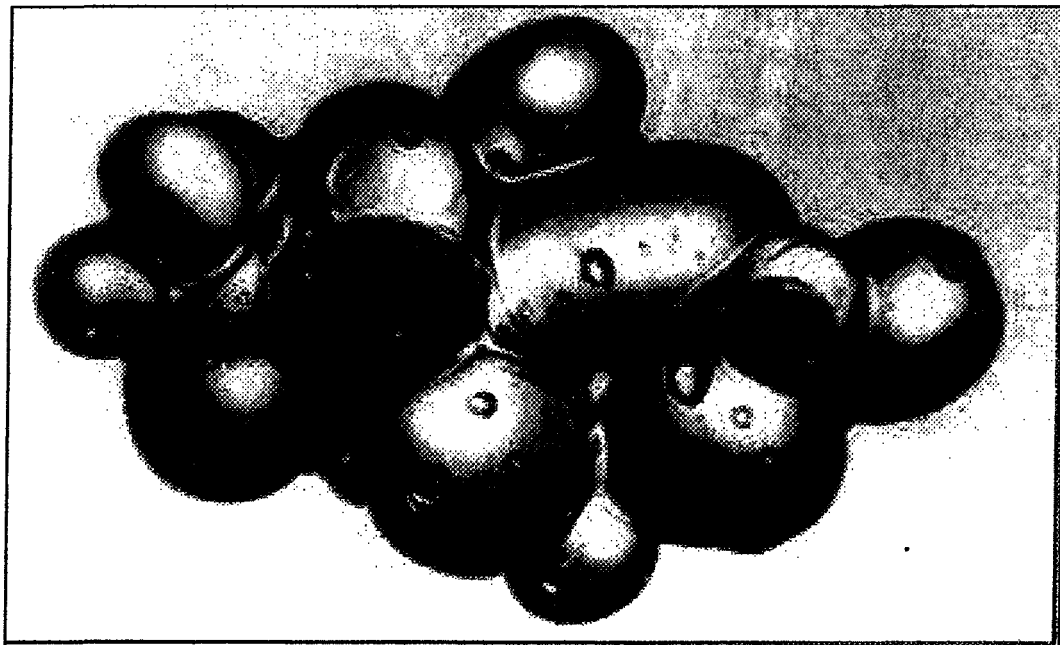
Denoth (1980) a obtenu un degré de saturation d'environ 14 % du volume des pores, pour la transition de régime pendulaire au régime funiculaire, de l'eau répartie dans la neige. Il faut souligner que la quantité de saturation liquide et la LWC sont des mesures différentes. Les deux mesures ne sont pas directement proportionnelles, bien que la LWC permet au calcul de la saturation liquide. De plus, la LWC peut être mesurée très facilement, à l'aide d'instruments simples, c'est pourquoi elle est utilisée pour évaluer la quantité d'eau liquide présente dans la neige.

#### *A. La neige collante en régime pendulaire*

Le régime pendulaire correspond dans le cas où la quantité d'eau liquide est faible (LWC volumique < 7 %). L'eau liquide sous l'effet des forces capillaires se loge autour des points de contact, formant ainsi un ménisque d'eau entre les grains ainsi que dans

les pores. Dans cette situation, les diamètres des grains et surtout les forces capillaires exercées entre les grains vont faire abaisser la température d'équilibre ou point de fusion de la glace. Plus la quantité d'eau est faible et plus les forces capillaires deviennent importantes et abaissent la température de fusion (de l'ordre du millièème de degré au-dessous de 0 °C). Les plus petits grains auront tendance à fondre les premiers par rapport aux plus gros (Colbeck 1982, 1995). Dans ce cas, l'eau liquide libérée migre vers les grains restants, provoquant leur arrondissement et leur grossissement lorsque l'accrétion est soumise à des charges dues au vent et aux échanges thermiques avec l'environnement et le câble.

Dans de telles conditions, Admirat et Sakamoto (1988) ont suggéré que le processus de regroupement et de l'arrondissement complet se produit au cours des quelques secondes après l'impact des gouttelettes d'eau liquide.



**Figure 6 : Regroupement de grains en régime pendulaire.**

(Colbeck, 1995)

Ces changements d'état solide à liquide et inversement, entraînent la métamorphose de la neige. Dans ce régime de faible LWC, l'eau liquide n'est pas continue et cela rend la vitesse de métamorphose plus lente. Ainsi, le grossissement des grains est assez lent du fait de la présence de surface de contact et par conséquent une plus grande résistance (Fig. 7), mais devient plus rapide lorsque la LWC augmente. De plus, la densité est beaucoup plus faible s'il y a de grands espaces remplis d'air entre les grains. Comme la densité de la neige collante augmente environ au-dessus de  $0.6 \text{ g/cm}^3$ , les groupements de grains sont remplacés par un réseau de liaisons entre les grains et, donc, la résistance est encore augmentée (Colbeck 1982).

Cependant, même si la transformation reste lente, on observe un arrondissement ainsi qu'un grossissement global des grains. Par ailleurs, la présence de fortes pressions capillaires entre les grains maintient une assez bonne cohésion d'ensemble.

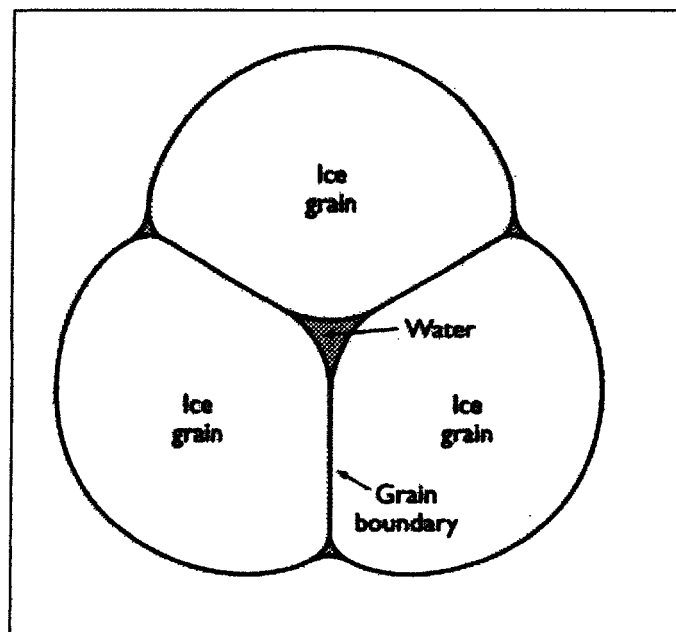
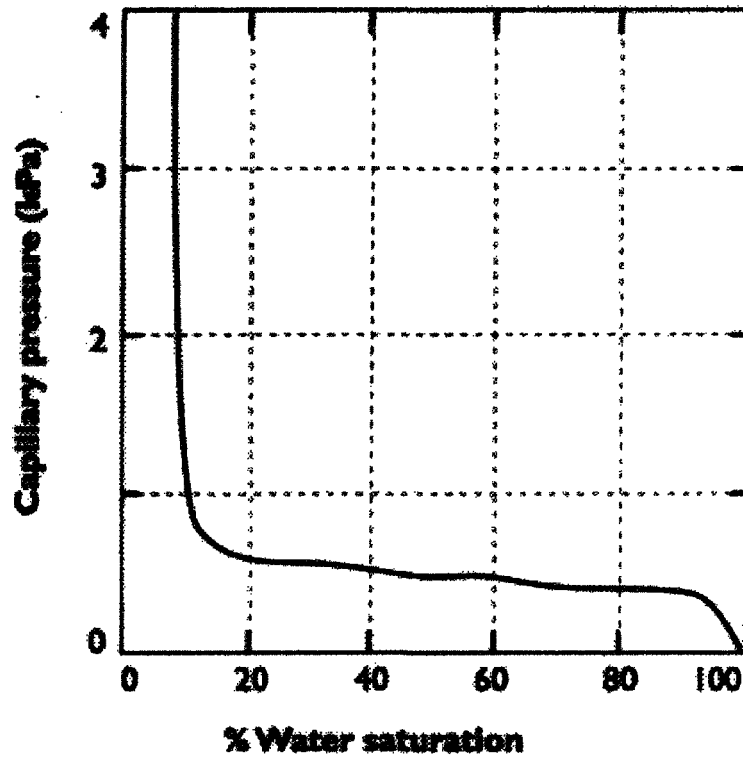


Figure 7 : Surface de contact entre les grains de glace.

(Colbeck, 1982)

*B. La neige collante en régime funiculaire*

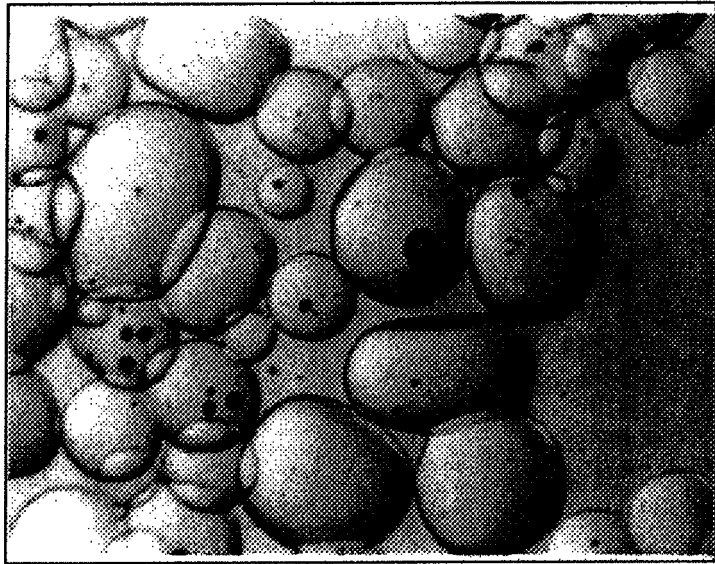
Lorsque la LWC (par volume) devient importante ( $>20\%$ ), c'est-à-dire lorsque la phase liquide devient continue, les interfaces glace/air n'existent plus ou très peu. Dans ce cas, la pression capillaire est faible (fig. 8), et seul le rayon de courbure des grains a un effet sur la modification de la température du point de fusion de la glace (de l'ordre du dix millième de degré au-dessous de  $0^{\circ}\text{C}$ ). Les grains les plus petits fondent alors au profit des plus gros sur lesquels il y a regel puisque la température de fusion y est plus élevée. De la même façon, les parties les plus convexes fondent aussi au profit de celles qui le sont moins et notamment des parties concaves (figure 9). Dans ce cas, les transformations sont plus efficaces parce que les flux de chaleurs dus aux changements de phase se font facilement entre les grains par la phase liquide, sa conduction thermique étant nettement supérieure à celle de l'air. En outre, la contrainte exercée aux points de contact entre les grains, si elle est assez forte (à la base d'un manteau neigeux épais), a pour conséquence d'abaisser la température du point de fusion à cet endroit. On observe alors une fusion et un élargissement des contacts. Cet effet est important puisque le point de fusion peut être de l'ordre du millième ou du centième de degré au-dessous de  $0^{\circ}\text{C}$ . Dans ce régime de métamorphose, on assiste à une densification rapide avec arrondissement et grossissement des grains, mais d'un point de vue mécanique la disparition des liaisons entre les grains diminue fortement la cohésion globale.



**Figure 8 : Pression capillaire en fonction de la saturation**

([http://web.mst.edu/~numbere/CP/CHAPTER%203.htm#\\_Toc506795462](http://web.mst.edu/~numbere/CP/CHAPTER%203.htm#_Toc506795462))

Les liaisons entre la glace disparaissent avec l'augmentation de la LWC. Comme le nombre de liaisons diminue, les forces cohérentes sont réduites aux forces capillaires, qui sont fortes en tension, mais faibles en cisaillement. Par conséquent, le délestage naturel se produit lorsque les forces aérodynamiques et gravitationnelles dépassent les forces internes, celles permettant à la cohésion de la neige et l'adhésion avec le câble (Grenier et al. 1986, Poots 1996).



**Figure 9 : Grains de neige collante en régime funiculaire**

([http://web.mst.edu/~numbere/CP/CHAPTER%203.htm#\\_Toc506795462](http://web.mst.edu/~numbere/CP/CHAPTER%203.htm#_Toc506795462))

### *2.2.3) L'adhésion*

Pour qu'une douille de neige se forme, il doit y exister un pouvoir adhésif entre les flocons de neige et la surface du fil et, aussi, un pouvoir de cohésion entre les flocons de neige. Effectivement, sans cette force d'adhésion, les flocons de neige tombés sur le fil seraient enlevés seulement par le vent. Sakamoto (2000, 2005) décrit l'origine de ce pouvoir adhésif :

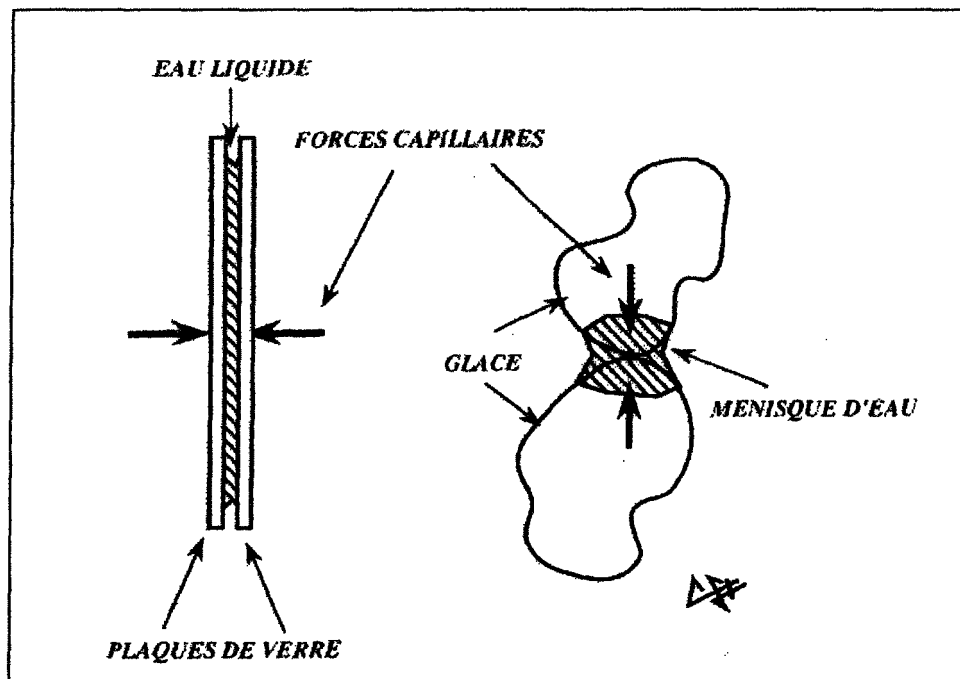
1. Congélation (incluant la pression de fonte et la recongélation)
2. Action de la congélation des gouttelettes d'eau surfondues existant sur les flocons de neige

3. Agglomération
4. Condensation et congélation de la vapeur dans l'air
5. Enchevêtrement mécanique des flocons de neige
6. Action capillaire due à l'eau liquide
7. Liaisons créées entre les particules de glace par le métamorphisme des flocons de neige

Sakamoto (2000, 2005) précise que dans les cas où la température de l'air est relativement basse, ce sont les mécanismes adhésifs (2), (3), (4) et (5) qui dominent. Par contre, dans les cas de températures plus hautes, on s'attend à ce que les mécanismes (6) et (7) soient dominants. Ainsi, les mécanismes adhésifs dominants sont influencés par la teneur en eau liquide des flocons de neige, de la température de l'air, de l'humidité et de la vitesse des flocons de neige portés par le vent.

L'adhésion de la neige sur les objets est possible par l'action de plusieurs forces, cependant les deux forces les plus dominantes sont : les forces capillaires et les forces de liaison entre les particules de glace. Quelques hypothèses fondées sur des observations d'accumulation de neige collante montrent que les forces capillaires apparaissent nécessaires. Les forces capillaires, fortes en tension, sont provoquées par le

contact de l'eau liquide et de la glace, mais demeurent négligeables en cisaillement. Puisque les formes observées sont cylindriques, d'autres forces de cisaillement sont nécessaires afin de résister aux forces du vent et de la pesanteur. L'explication la plus plausible reste que les grandes résistances au cisaillement sont les conséquences des liaisons entre les particules de glace (Colbeck/Ackley, 1982).



**Figure 10 : Force capillaire**

**A) entre deux plaques de verre mouillées,**

**B) entre deux particules de glace.**

(<http://www.toraval.fr/livre/chap3.pdf>)

De plus, le vent est primordial à une accumulation et aussi à l'adhésion. Sakamoto (2000) met en évidence la triple action du vent: elle rend la neige accumulée plus compacte; elle augmente la vitesse d'impact des flocons de neige sur les fils ou les douilles de neige; et elle accélère le métamorphisme de la neige accumulée.

De plus, la LWC joue un rôle important dans les forces d'adhésion entre la neige et le conducteur, et aussi dans les forces internes dans un échantillon de neige. À de faibles LWC, proche de 0 %, les forces adhésives sont quasiment inexistantes et la neige correspond plus à de la neige sèche. Pour des valeurs de la LWC (volumique) comprises entre 10 et 15%, les forces adhésives sont très fortes, et la douille peut se développer sauf si elle se casse par un choc ou des vibrations. Par contre, lorsque la LWC atteint de hautes valeurs, la douille devient très visqueuse et se brise sous la gravité (Grenier, Admirat, 1986).

### **2.3) Observation dans la nature**

Les observations d'accumulation de neige collante sont rares et souvent propres à des régions, et se réalisent généralement, après des heures ou des jours, après une tempête de neige. Pour ces raisons, les accumulations de neige collante restent difficiles à étudier. Par rapport à d'autres types de givrage, il est plus difficile d'observer l'accumulation naturelle de neige collante, car la neige pourrait se jeter dans un laps de temps relativement court ou subir des changements rapides dans sa LWC.

#### *2.3.1) Pendant l'accumulation*

Selon Wakahama et al. (1977), Shōda fut le premier à étudier en détail, au début des années 1950, le processus d'accroissement et les mécanismes d'une augmentation de neige sur des câbles. Shōda a observé des accrétions de neige collante à des

températures variant entre -1 °C et +1.5 °C, et des vitesses de vents inférieures à 3 m/s. Cependant, la neige observée fut de faible densité (0.2 g/cm<sup>3</sup>). Sakamoto (2000) rapporte que les accrétions de neige sèche sont facilement soufflées des câbles à des vitesses de vent excédant 2 m/s, et celles-ci excèdent rarement une densité de 0.1 g/cm<sup>3</sup>. Concernant cette gamme de températures et de vitesses de vent, il s'avérerait que Shōda décrivait un mélange d'accumulations de neige sèche et humide semblable au genre d'accumulations qui se produit parfois en France. Dans un programme français sur la neige collante de 1983 à 1990, Admirat et al. (1990) rapportaient qu'une succession de flocons de neige collante et sèche était souvent observée à des températures près des 0 °C avec des densités comprises entre 0.10 et 0.22 g/cm<sup>3</sup> pour des vitesses de vent variant entre 0 et 5 m/s.

Les efforts de recherche faits par le Japon et la France montrent que ces pays sont vulnérables aux accumulations de neige humide sur des câbles et structures aériens. Sakamoto (2000) rapporte seulement 14 incidents dus à la neige collante au Japon, de 1962 à 1985. Les chutes de neige humides ne se produisent pas souvent au Japon : seulement une ou deux fois par an (Sakamoto 2005). Pendant les 50 dernières années, les données japonaises ne montrent pas la répétition d'incidents graves de neige humide (Sakamoto et al. 2005).

En France (figure 11), les chutes de neige collante se produisent en moyenne deux à trois fois par an. Il y a eu plusieurs hivers sans de tels événements, et plusieurs autres où les événements allaient jusqu'à sept précipitations de neige humide (données recueillies par Strauss (1986) sur 30 ans). Les données rapportées pour la France, voir le Tableau 1, représentent des données sur un programme de contrôle de 7 ans, de 1983 à 1990.

Cependant, ces données ne doivent pas être employées pour tirer des conclusions sur des densités typiques que l'on retrouverait en France.

Les données pour l'Islande montrent qu'en moyenne il se produit 8 à 10 précipitations par an (Eliasson et Thorsteins, 1996 et 2000). Dans beaucoup de cas, les événements sont localisés, mais ils couvrent la moitié du pays. Des essais sur des câbles aériens sont actuellement toujours sous surveillance en Islande.

	France	Japon	Islande
vitesse du vent (m/s)	0 - 5	0 - 3	10 -25
densité (g/cm <sup>3</sup> )	0.1 - 0.22	0.2	0.3 - 0.95
surcharge de neige (kg/m)	0 - 10	0 - 5	0 - 20

**Tableau 1 : Densité, vitesse du vent et surcharge de la neige en France, Japon et Islande (Admirat et al. 1990, Wakahama et al. 1977, Sakamoto 2000 et Eliasson et Thorsteins 1996, 2000)**



**Figure 11 : Accumulation de neige collante en Savoie**  
([www.lameteo.org/actu240106.JPG](http://www.lameteo.org/actu240106.JPG))

### *2.3.2) Pendant le délestage*

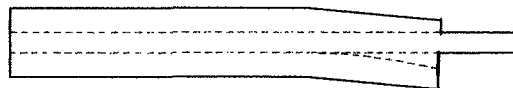
Il y a très peu de littérature commentant le délestage dans des conditions naturelles. Comme il a déjà été mentionné, ces observations sont très difficiles. Cependant, la perte de neige se produit avec une augmentation de la teneur en eau liquide, selon l'équilibre thermique. Mais malgré ceci, il demeure difficile de prévoir la chute de neige exactement, puisqu'elle dépend de nombreux facteurs externes et de sa densité. Selon Sakamoto et Admirat (1988), la chute de neige se produit lorsque la teneur en eau liquide dépasse les 40 % par masse. Généralement, dans les quelques pays où il y a eu

des observations d'accumulation, les douilles cylindriques se jettent partiellement et aléatoirement de la portée, sur des longueurs allant jusqu'à plusieurs mètres. Le délestage total par des chutes partielles peut avoir lieu en quelques minutes.

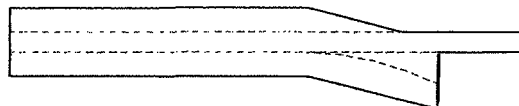
Pendant des événements de neige collante, on a observé des cycles successifs d'accumulation et de perte (cycles en dents de scie de chargement) sur les câbles aériens (Roberge, 2006). Il est possible d'augmenter la fréquence de ces cycles en employant un chauffage par effet de Joule afin d'augmenter la LWC des douilles de neige humide, ce qui favorise la perte. Il a été observé que la perte de neige se produit d'une façon aléatoire et partielle sur des conducteurs de phase. Chaque chute de neige partielle produit une certaine vibration qui va accentuer la chute de neige des morceaux adjacents, et ainsi de suite (figure12).



a) Début de l'expérience



b) Formation d'une cavité



c) L'extrémité de la neige est sous le cable

**Figure 12 : Les étapes jusqu'au délestage**

Poots (1996) a suggéré qu'un manteau de neige mouillée peut aussi se délester du câble, subitement et entièrement, sur toute la longueur. Cependant, aucune observation n'est mentionnée et il est très improbable que toute la neige puisse se jeter au même instant. Cependant, Roberge (2006) précise qu'un ingénieur d'Hydro Québec a fait quelques observations sur des lignes expérimentales à Varennes en mars 2001. Comme la plus part des auteurs, il observa un délestage de façon partielle et au hasard sur les conducteurs. Certains câbles se délestaient morceau par morceau sur toute la longueur entière, et provoquant de grandes oscillations.

Par conséquent, le délestage des douilles de neige collante se fait naturellement en quelques heures après leur accumulation. Les effets thermiques tels que la convection forcée, la radiation solaire et l'effet de Joule contribuent à l'augmentation de la teneur en eau liquide des accrétions de neige: lors de valeurs élevées de la teneur en eau liquide, les douilles de neige perdent leur cohésion et tombent sous l'effet de la gravité et de la force du vent (Admirat et al. (1988) ; Poots (1996) ; Sakamoto (2000)).

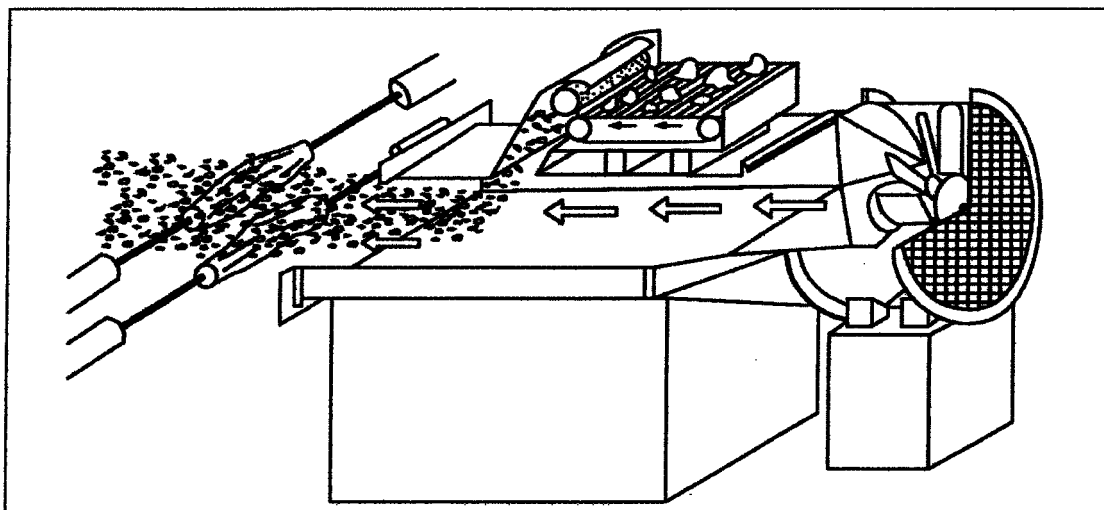
## **2.4) Simulation expérimentales**

### *2.4.1) De l'accumulation*

Sakamoto (2000, 2005) nous rappelle que l'accumulation de la neige sur les lignes aériennes est très difficile à simuler. Plusieurs raisons sont invoquées, d'abord, parce qu'il y a plusieurs mécanismes physiques qui sont impliqués pendant une accumulation de neige. Deuxièmement, il y a beaucoup de difficultés à réunir des conditions normales

en laboratoire. Troisièmement, l'accrétion de neige peut se produire sous une multitude de combinaisons des paramètres météorologiques, rendant les observations difficiles, particulièrement pour des combinaisons qui se produisent rarement. De plus, les simulations d'accrétions de neige ne peuvent être réalisées que pendant la période d'hiver seulement. Sakamoto (2005) propose quatre méthodes de reproduire de la neige collante artificiellement. Mais malgré ceci, la teneur en eau liquide des flocons de neige et la température ambiante en laboratoire resteront différentes des conditions réelles.

Une soufflerie installée avec un dispositif pour reproduire des particules de neige humide a été utilisée pour étudier le processus d'accumulation et ses mécanismes de la neige sur un câble. Les morceaux de neiges sont rassemblés, écrasés, puis enfin pulvérisés par de l'eau à 0 °C, avant qu'ils soient projetés sur le câble perpendiculairement grâce à un écoulement d'air (Wakahama, 1997).



**Figure 13 : Équipement d'une soufflerie pour reproduire une accrétion de neige collante**  
(Tirée de Sakamoto 2000)

Dans les années 70 au Japon, des études ont été réalisées sur les processus de croissance des accumulations de neige, des forces d'adhésions de la neige sur un fil, les trajectoires des flocons de neige heurtant un câble à des vitesses variées (Wakahama et al. 1977). La neige humide est faite à partir de la neige sèche, en la réchauffant ou en la pulvérisant avec l'eau.

Sakamoto (2000, 2005) a réalisé des expériences en laboratoire dans le but d'examiner la dépendance des paramètres météorologiques sur le processus d'accrétion de la neige mouillée. Cependant, les paramètres réellement mesurés furent : la masse des flocons de neige passant autour du fil, la vitesse du vent, la température de l'air, l'humidité relative, la LWC des flocons de neige qui heurtent le câble et la masse de neige accumulée. Shugo (2002) réalisa des expériences similaires en variant le diamètre des câbles.

#### *2.4.2) Du délestage*

Sakamoto (2005) décrit très brièvement quelques remarques et observations du délestage en laboratoire. D'abord, il précise qu'à chaque fois la perte de la neige s'est produite aléatoirement. Néanmoins, les tendances suivantes ont été observées :

1. La neige accumulée de faible densité se déleste plus facilement que la neige accumulée avec une densité plus grande

2. Les accumulations produites avec des vents forts sont plus difficiles à tomber du câble
3. La probabilité de la chute de la neige ne dépend pas forcément de la température ambiante
4. Un fil ayant une plus forte rigidité de torsion a tendance à rejeter la neige accumulée plus facilement qu'un fil avec une plus petite rigidité de torsion
5. Une fois que la douille recouvre complètement le fil, il est beaucoup plus difficile aux forces extérieures de délester la neige accumulée

Roberge (2006) a développé une technique peu coûteuse à l'aide d'outils simples pour reproduire les douilles humides de neige. Cette méthode est utilisée afin de reproduire les douilles de neige, et sera expliquée plus en détail dans le prochain chapitre : l'expérimentation. Il a réalisé trois séries d'expériences : (1) le câble se trouve concentrique avec la douille de neige, (2) le câble est placé légèrement sur la partie supérieure de la douille de neige, donc le câble n'est plus concentrique avec la douille et, (3) une cavité cylindrique est déjà sous le câble (qu'il fait à l'aide d'un cylindre de diamètre inférieur à celle de la douille). Cependant, Roberge réalisera ses expériences avec des paramètres atmosphériques constants. La température fut contrôlée et constante à 3 °C, sans aucun vent et une série fut réalisée avec des lampes halogènes

afin de simuler le rayonnement du soleil. De plus, il a aussi réalisé une série de délestage forcé sur une douille de neige plus courte.

Il a pu observer deux tendances pour des mêmes conditions atmosphériques:

- La neige mouillée avec une plus grande LWC initiale prend moins de temps à se délester.
- La neige mouillée, avec une plus grande densité initiale prend plus de temps à se délester qu'une douille avec une plus faible densité.

Il a, aussi, observé, que pour de hautes valeurs de la LWC, quelque instant avant le délestage, que la section transversale de la douille s'allonge légèrement, devenant plus tôt une ellipse qu'un disque et se forme une cavité au-dessous du câble, puisque la neige migre peu à peu sous l'effet de la gravité.

De plus, il est précisé que la neige accumulée commence à fondre à cause de l'élévation de la température de l'air, du rayonnement solaire, etc. L'eau liquide produite par la fonte de la neige se déplace vers la partie inférieure de la douille cylindrique qui est due à la pesanteur. Lorsque cette partie de la douille devient saturée en eau liquide, et semble être transparente, la chute de la neige semble très proche. Sakamoto (2005) fut

l'un des premiers à remarquer l'existence d'un transfert de masse dans le processus de fonte.

## **2.5) Les modèles existants d'accumulation et de délestage de neige**

*2.5.1) Modèle d'accumulation de neige de Grenier, Admirat (1986), Sakamoto (2000), Poots et Skelton (1994)*

Ces auteurs proposent les premières approches théoriques, qui ne tiennent pas compte des critères mécaniques, et qui concernent seulement une formation de douille de neige de forme cylindrique autour des conducteurs. On peut fréquemment observer cette forme cylindrique en conditions normales autour de chaque conducteur avec une basse rigidité de torsion. Ce modèle d'accumulation de neige collante est basé sur le bilan de chaleur.

Les échanges thermiques peuvent être résumés par la somme de quatre termes :

- La chaleur de convection, qui dépend de la différence de température entre l'air et la surface de la neige ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), du coefficient de chaleur par convection (qui est proportionnel à la vitesse du vent) et de la surface.

- La chaleur de fusion qui peut être calculée à l'aide de la chaleur latente de fusion, de la teneur en eau liquide des flocons de neige, de la surface et du coefficient de collection.
- La chaleur d'évaporation/condensation qui dépend de la vitesse du vent, de la différence entre le rapport de la vapeur d'eau saturée de l'air à la température de l'air  $T_a$  et sur la douille de neige à 0 °C.
- La chaleur par effet de Joule qui est le produit de la résistance électrique par le carré du courant en Ampère.

Les auteurs précisent toutefois que les chaleurs dues à la radiation sont négligées, puisqu'en règle générale, pendant l'accumulation, la radiation est assez faible à cause des conditions nuageuses.

Dans le modèle de Grenier et Admirat, les auteurs précisent les conditions minimales de l'intensité de précipitation afin d'obtenir une douille de neige. Un calcul de la masse accumulée et du diamètre de la douille est aussi décrit en fonction des paramètres météorologiques et du temps. Enfin, à l'aide de l'équation bilan de chaleur du système, le ratio de la neige qui fond peut être calculé, et la teneur en eau liquide peut être mesurée en fonction du temps.

La chaleur latente d'évaporation/condensation dans le modèle de Grenier et Admirat est fonction du coefficient de convection. Alors que dans le modèle de Poots et Skelton, l'évaporation et la sublimation sont considérées, une petite quantité d'eau liquide est évaporée et qu'une petite quantité de glace est sublimée.

Cependant, ces modèles étudient l'équilibre thermique pendant l'accrétion, alors que le sujet de recherche dans notre cas, se concentre sur l'après accrétion. Par conséquent, des ajustements sur les différents termes du bilan de chaleur devront être apportés afin de mieux représenter la situation.

#### *2.5.2) Le modèle numérique de Roberge (2006)*

Roberge a développé une technique de modélisation numérique utilisant une méthode non linéaire des éléments finis afin d'évaluer la réponse dynamique d'un câble aérien pour n'importe quel scénario de déchargement. Cette réponse dynamique, correspondant à la propagation du délestage de la neige, est une fonction associée à la masse de chaque élément de neige.

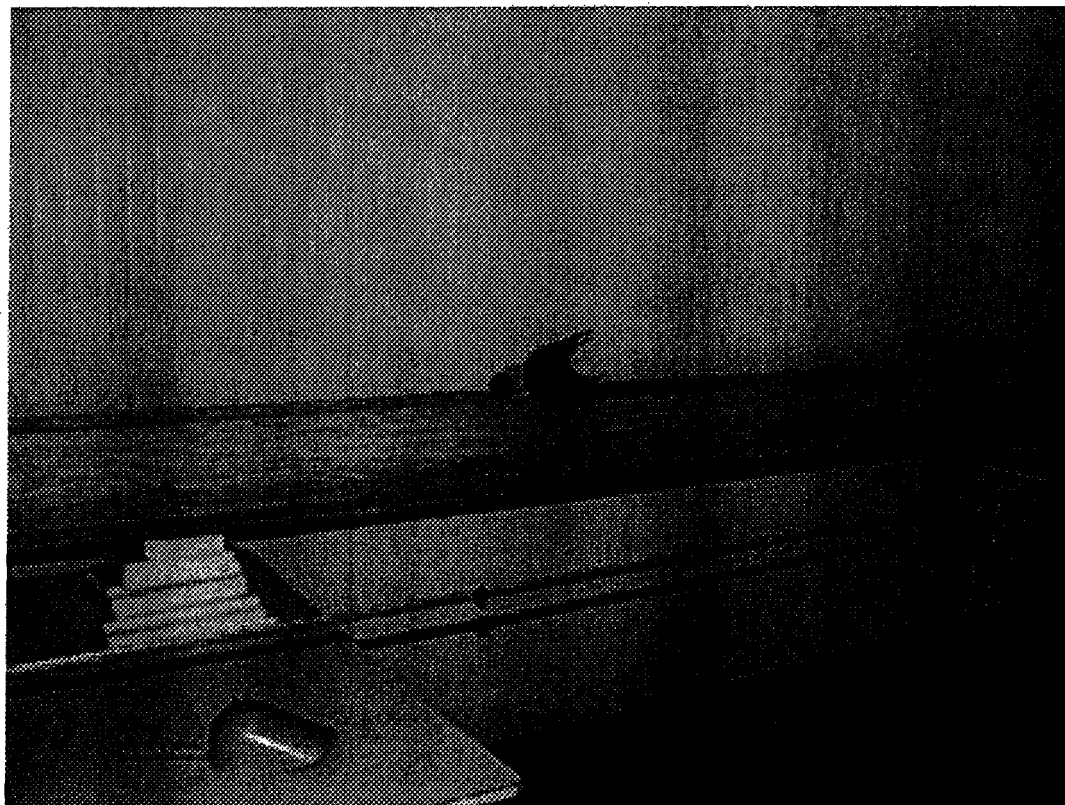
## CHAPITRE 3

### EXPERIMENTATION

A fin de mieux comprendre les phénomènes de délestages et les critères de son déclenchement, des douilles de neiges ont été reproduites au pavillon de recherche sur le givrage (la CIGELE) à l'Université du Québec à Chicoutimi. La CIGELE possède les équipements nécessaires pour effectuer cette recherche en utilisant une de ces trois grandes chambres froides. Les expériences se sont déroulées pendant toute la période de chute de neige en hiver. La région de Chicoutimi reçoit plusieurs de mètres en chutes de neige normales chaque hiver. La neige sèche et fraîche est récoltée sur le campus de l'UQAC afin de pouvoir reproduire des douilles de neiges. Cette section décrit l'installation expérimentale, la procédure pour la réalisation d'une douille de neige collante et la technique de mesure de la LWC.

### **3.1) Installations de l'expérience**

La figure 14 montre les équipements utilisés pour reproduire une douille de neige. À environ un mètre du sol, un câble électrique (ALCAN Pigeon ACSR, 12.75 mm de diamètre) est maintenu horizontalement à l'aide de tendeurs. Un moule en bois a été fabriqué, à l'intérieur un demi-cylindre est posé, et un autre demi-cylindre en plastique a été construit.



**Figure 14 : Les matériaux nécessaires a la fabrication de la douille**

Toutes les expériences ont été réalisées dans l'une des chambres froides, où la température de la chambre peut être contrôlée. La température est un paramètre variant de 1 à 5 °C. Le vent, qui produit dans la chambre froide à l'aide d'une ventilation, peut varier jusqu'à 4 m/s, cependant les vitesses nulles ne sont pas possibles en raison du système de refroidissement qui créait un vent de 0.6 m/s. Le rayonnement de soleil est simulé en utilisant des lampes halogènes. L'intensité lumineuse,  $I_m$  est mesurée à l'aide d'un luxmètre allant de 450 à 900 lux. Comme le montre la figure 15, l'utilisation de seulement une lampe a une intensité lumineuse de 450 lux, alors que l'installation des trois lampes permet de doubler l'intensité lumineuse. Le courant électrique, qui est produit à l'aide de la génératrice (Figure 16 et 17), permet ainsi de réaliser des expériences allant jusqu'à 500 A. L'humidité relative est évaluée à environ 80 %, mais n'a pas été mesurée.

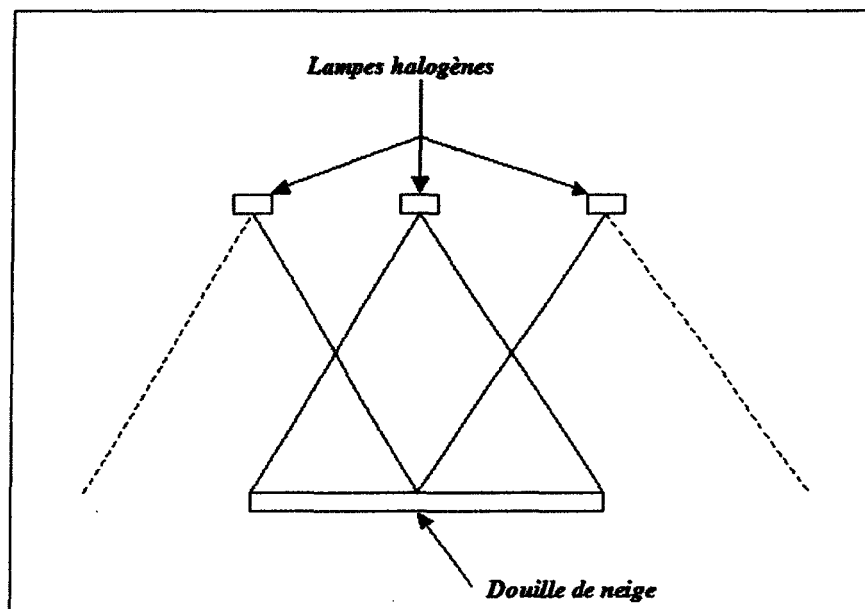
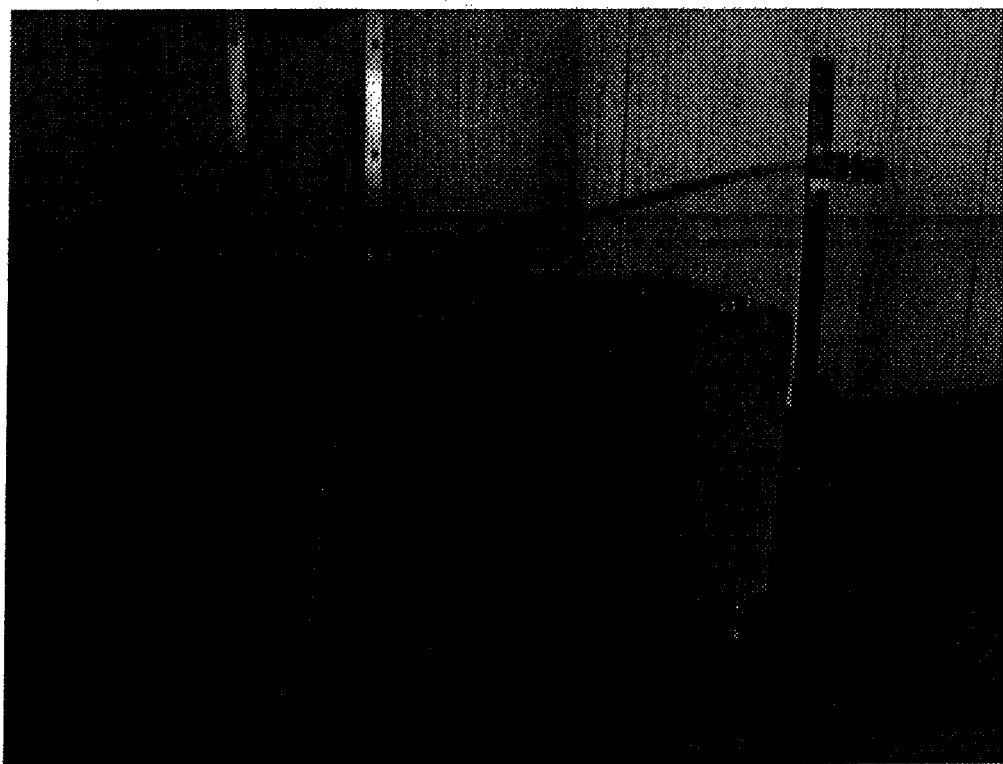


Figure 15 : Utilisation des lampes halogènes



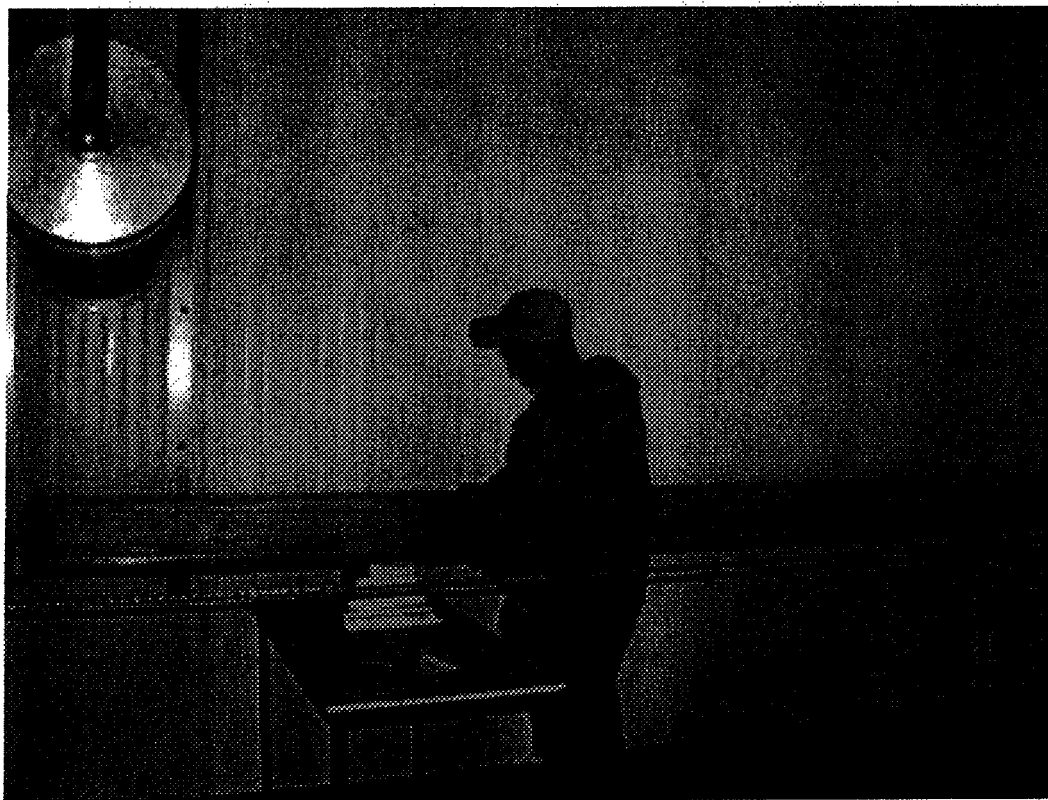
**Figure 16 : Génératrice (source 3500 Ampères AC)**



**Figure 17 : Connexion entre le câble et la génératrice**

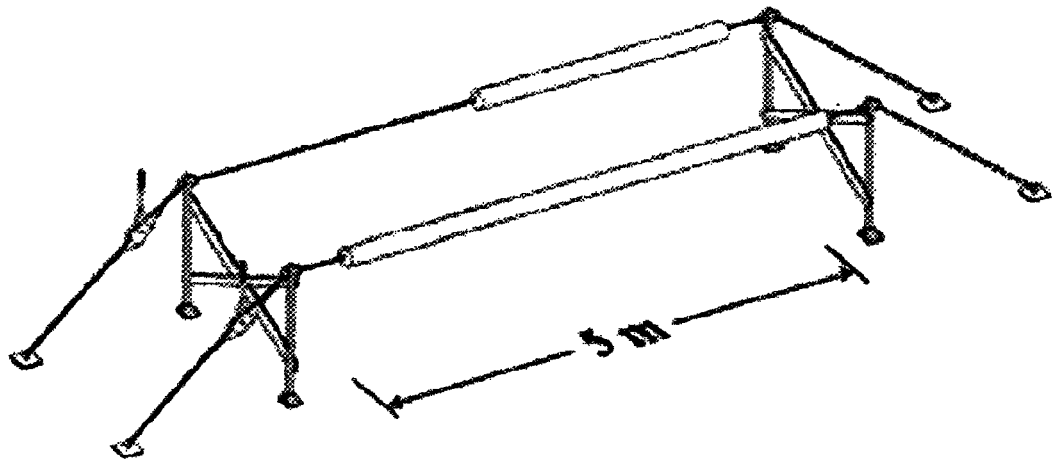
### **3.2) Fabrication de la douille de neige collante**

La neige humide utilisée pour les expériences a été obtenue à l'aide de la neige sèche fraîche, laisser un certain temps avec une température d'environ 3 à 5 degrés selon la qualité de la neige sèche afin qu'elle devienne plus collante, dans le but d'obtenir une LWC désirée (de 10 à 15%). La neige sèche a été ramassée sur les couches supérieures des couches de neige extérieures. Cette méthode produit une neige humide avec une bonne uniformité en LWC et a été basée sur les recommandations données par Roberge (2006). La figure 18 illustre comment les douilles ont été moulées. La neige humide est étendue dans un moule semi-cylindrique et rendue compacte par une succession de frappes à l'aide d'un outil manuel demi cylindre en plastique.



**Figure 18 : Compression de la neige afin d'obtenir une douille cylindrique**

Le moule est placé sous le câble de façon à ce que ce dernier soit au centre du cylindre. La moitié supérieure de la douille est formée à l'aide d'un outil manuel demi cylindrique qui permet également de compresser les morceaux de neige humide (Fig. 14). En enlevant le moule de la douille fabriquée, le diamètre de la douille mesure dix centimètres et peut aller jusqu'à une longueur maximum de cinq mètres (Fig.19 et 20).



**Figure 19 : Installation des expériences à la CIGELE.**  
(Roberge, 2006)



**Figure 20 : Accumulation en laboratoire à la CIGELE**

### **3.3) Mesure de la teneur en eau liquide à l'aide d'un calorimètre**

Les mesures de la LWC sont effectuées grâce à une méthode de fusion calorimétrique (Colbeck et al. 1990), en suivant un simple calcul thermodynamique.

Les matériaux requis aux expériences afin de mesurer la quantité d'eau contenue dans un échantillon de neige sont :

- Un récipient adiabatique (un thermostat en d'acier inoxydable d'un litre avec un couvercle)
- Un thermomètre digital
- Une balance

#### *3.3.1) Calibration du calorimètre*

Avant de pouvoir mesurer la LWC à l'aide d'un calorimètre, il faut mesurer la capacité thermique du calorimètre. La capacité thermique du récipient peut être évaluée en mélangeant simplement de l'eau chaude et de l'eau froide dans le calorimètre. On le calcule en utilisant l'équation d'équilibre thermique du système.

$m_1$  = masse d'eau chaude en g

$T_1$  = température de  $m_1$

$m_2$  = masse d'eau froide en g

$T_2$  = température de  $m_2$

$$m_3 = m_1 + m_2$$

$T_3$  = température finale du mélange

$c_{\text{eau}}$  = chaleur spécifique de l'eau = 4.187 kJ/kg.K

$C_{\text{calorimetre}}$  = capacité thermique du calorimètre

La procédure :

- Rincer le calorimètre, le vider et le sécher
- peser la masse  $m_1$
- Mettre la masse  $m_1$  dans le calorimètre, refermer avec le couvercle, remuer et laisser pendant une minute
- Mesurer la température  $T_1$
- Peser  $m_2$  et mesurer  $T_2$
- Mettre  $m_2$  dans le calorimètre, refermer et laisser pendant environ une minute
- Mesurer  $T_3$

En considérant qu'il n'y ait pas d'échange de chaleur avec l'environnement, toutes les chaleurs gagnées par l'eau pendant le mélange viennent du calorimètre. La mesure de la LWC est assez rapide, de trois à cinq minutes, on peut considérer que la température de  $T_1$  et  $T_2$  restent constantes.

L'équation de chaleur du système :

$$m_1 * c_{eau} * T_1 + C_{calorimetre} * T_1 + m_2 * c_{eau} * T_2 = m_3 * c_{eau} * T_3 + C_{calorimetre} * T_3$$

En solutionnant pour  $C_{calorimetre}$ , on obtient :

$$C_{calorimetre} = \frac{m_3 * T_3 - m_1 * T_1 - m_2 * T_2}{T_1 - T_3} * c_{eau}$$

En remplaçant  $m_3 = m_1 + m_2$ , et en mettant  $\mu = C_{calorimetre} / c_{eau}$ , on a :

$$\mu = \frac{m_1 * (T_3 - T_1) + m_2 * (T_3 - T_2)}{(T_1 - T_3)}$$

Le calcul de la capacité thermique du calorimètre est important afin d'obtenir des valeurs de la teneur en eau liquide précisément. De nombreux tests ont été réalisés, avec des résultats pour la capacité thermique du calorimètre assez semblables. Voici un exemple de calcul :

$$m_1 = 522.5 \text{ g}$$

$$m_2 = 495.5 \text{ g}$$

$$T_1 = 55.9^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 13.6^\circ\text{C}$$

$$T_3 = 35^\circ\text{C}$$

On obtient :

$$C_{calorimetre} = \frac{m_3 * T_3 - m_1 * T_1 - m_2 * T_2}{T_1 - T_3} * c_{eau}$$

$$= 0.042 \frac{kJ}{K}$$

$$\mu = \frac{C_{calorimetre}}{c_{eau}} = \frac{m_1 * (T_3 - T_1) + m_2 * (T_3 - T_2)}{(T_1 - T_3)}$$

$$= 0.01003824 \text{ kg}$$

### 3.3.2 Mesure de la teneur en eau liquide d'un échantillon de neige

Une expérience semblable à l'étape ci-dessus est exécutée pour obtenir la teneur en eau liquide d'un échantillon de neige.

$m_1 = 500 \text{ g}$  d'eau chaude

$T_1$  = température de  $m_1$

$m_2 = m_{2l} + m_{2s}$  = masse de l'échantillon de neige (partie liquide + partie solide)

$T_2$  = température de l'échantillon de neige (0 °C si c'est de la neige mouillée)

$m_3 = m_1 + m_2$  = masse totale

$T_3$  = température finale du mélange

$c_{\text{glace}}$  = chaleur spécifique de la glace = 1.84 kJ/kg.K

$L$  = Chaleur latente de fusion de l'eau = 333.51 kJ/kg

La procédure est la même que précédemment pour le calibrage du calorimètre, hors que la masse et la température 2 correspond à ceux de la neige.

L'équation de chaleur du système (eau + neige humide + calorimètre):

$$m_1 * c_{\text{eau}} * T_1 + C_{\text{calorimetre}} * T_1 + m_{2L} * c_{\text{eau}} * T_2 + m_{2S} * c_{\text{glace}} * T_2 - m_{2S} * L \\ = m_3 * c_{\text{eau}} * T_3 + C_{\text{calorimetre}} * T_3$$

En remplaçant  $m_3 = m_1 + m_{2L} + m_{2S}$ , en divisant par  $c_{\text{eau}}$  et en réarrangeant, on obtient:

$$m_{2L} = \frac{m_2 * (\frac{c_{\text{glace}} * T_2 - L}{c_{\text{eau}}} - T_3) - (m_1 + \mu)(T_3 - T_1)}{(\frac{c_{\text{glace}} * T_2 - L}{c_{\text{eau}}} - T_2)}$$

Enfin, on obtient la teneur en eau liquide dans un échantillon de neige :

$$LWC = \frac{m_{2L}}{m_2} * 100 \text{ en \%}$$

### 3.3.3) Analyse d'erreur de la mesure de la LWC

La précision de la mesure de la teneur en eau liquide dépend principalement de la précision des mesures et de la précision des appareils de mesures. Les mesures des masses varient  $\pm 0.5\text{g}$  en raison des appareils de mesure et de la manipulation, c'est-à-dire la perte de neige ou d'eau lorsque la neige et l'eau sont mélangées dans le calorimètre. Le thermomètre digital a une précision de  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ .

Source d'erreur	Précision	Paramètre affecté par la source d'erreur	Erreur max du paramètre	Erreur max de la LWC
Échelle graduée	$\pm 0.5 \text{ ml}$	Masse d'eau, $m_1$	$\pm 0.5 \text{ g}$	$\pm 2 \%$
Balance digitale	$\pm 0.01 \text{ g}$	Masse de neige, $m_2$	$\pm 0.51 \text{ g}$	$\pm 2 \%$
Manipulation	$\pm 0.5 \text{ g}$			
Thermocouple digital	$\pm 0.5^\circ \text{C}$	Température de l'eau chaude, $T_1$	$\pm 0.5^\circ \text{C}$	$\pm 6 \%$
		Température du mélange, $T_3$	$\pm 0.5^\circ \text{C}$	$\pm 13 \%$

Tableau 2 : Calcul d'erreur de chaque paramètre

Le tableau 2 montre les erreurs dues à un paramètre. La masse d'eau chaude est généralement de 500 g à des températures variant entre 70 et 90 °C. Par contre, la masse de neige récoltée sur la douille cylindrique varie de 200 à 500 g, donnant une température entre 10 et 30°C pour le mélange avec l'eau chaude. Il est à noter que la masse de neige mesurée pour le calcul de la LWC et de la densité est généralement comprise entre 400 et 500g, en particulier en début de l'expérience pour la LWC initiale ( $< 20\%$ ) et dans ce cas, l'erreur maximale est de 2% (en combinant l'incertitude de chaque paramètres). Cependant, lorsque l'on approche de la fin de l'expérience, il subsiste de moins en moins de neige dans la partie supérieure de la douille de neige, dans ces conditions la LWC est supérieure à 20% et la masse de neige prélevée est comprise entre 200 et 400 g. Par conséquence, l'erreur dans des conditions réalistes est estimée à 21%, il s'agit d'une erreur totale considérant les effets de chaque paramètre. Toutes ces valeurs sur les précisions des mesures et des résultats ont été obtenues par des simulations numériques.

La réalisation des douilles a suivi ce protocole à chaque expérience, malheureusement, il fut très difficile, presque impossible, d'obtenir des conditions semblables pour chaque expérience, en ce qui concerne la LWC initiale et la densité initiale.

## CHAPITRE 4

### MODÈLE THÉORIQUE

Le but de ce chapitre se situe dans la description d'un modèle permettant de prédire la variation de la LWC de la neige collante dans une section circulaire à la fin de douille de neige accumulée sur un câble horizontal, ayant une flèche négligeable, en fonction des différents paramètres atmosphériques jusqu'à l'initiation du délestage. De plus, le modèle calcule la hauteur de la cavité en fonction du temps, et le temps de délestage.

Le calcul et le fonctionnement du modèle commence par une mise en place afin de définir les conditions de l'expérience : il s'agit des entrées du programme, les paramètres mis en jeu (température de l'air, vitesse du vent, l'intensité lumineuse des lampes halogènes et l'intensité du courant à travers le câble). De plus, on doit ajouter les constantes physiques et géométriques, la LWC initiale de chaque expérience et la densité, mais aussi la durée totale de l'expérience, afin que le modèle termine le calcul.

Le modèle, décrit en annexe 5, se fait en deux approches. Dans un premier temps, elle consiste à évaluer la LWC dans la douille de neige en général à l'aide du bilan de chaleur. Alors que la seconde approche prend en considération la percolation de l'eau dans la section supérieure par rapport au câble vers la partie inférieure et aussi, les changements de géométrie, les changements de surface de la partie supérieure et inférieure, et la hauteur de la cavité en fonction du temps dans la douille de neige afin d'évaluer la LWC selon la partie. Les deux prochains paragraphes expliquent plus en profondeur ces deux approches.

Dans cette première partie du modèle, il s'agit du premier pas, on procède au bilan de chaleur dans la douille de neige générale. La masse d'eau liquide créée par la quantité de chaleur fournie à la douille de neige, divisée par la masse totale de neige, permet d'obtenir une première approximation du changement de la LWC en fonction du temps selon les conditions atmosphériques mises en jeu.

Dans cette seconde partie du modèle, le changement de géométrie et de la densité de la douille de neige sont pris en compte afin de prédire la LWC dans les parties supérieures et inférieures de la douille de neige. Avant ceci, comme il est décrit dans les sections suivantes, le calcul de plusieurs particularités de la neige est calculé en fonction du temps tel que : la porosité, la saturation, la perméabilité, permettant ainsi, au calcul du flux volumique de l'eau dans la neige. Par la suite, la hauteur de la cavité qui se forme sous le câble est estimée nécessaire pour déterminer le changement de géométrie. Provoquant un angle avec le câble, l'extrémité de la douille de neige descend au fur et à

mesure jusqu'à délestage. Ainsi, il est possible d'obtenir les variations de la LWC et de la densité dans la partie supérieure et inférieure du manteau de neige par rapport au câble. La simulation se termine lorsque la partie supérieure ne contient plus de neige, il s'agit du délestage.

#### 4.1) Bilan de chaleur

Le manteau neigeux naturel est soumis à des échanges d'énergie avec le câble (par effet de Joule) et avec l'atmosphère : par convection, évaporation/sublimation et rayonnement. Ces termes sont à l'origine de la fonte de la neige, c'est-à-dire à l'augmentation de la LWC.

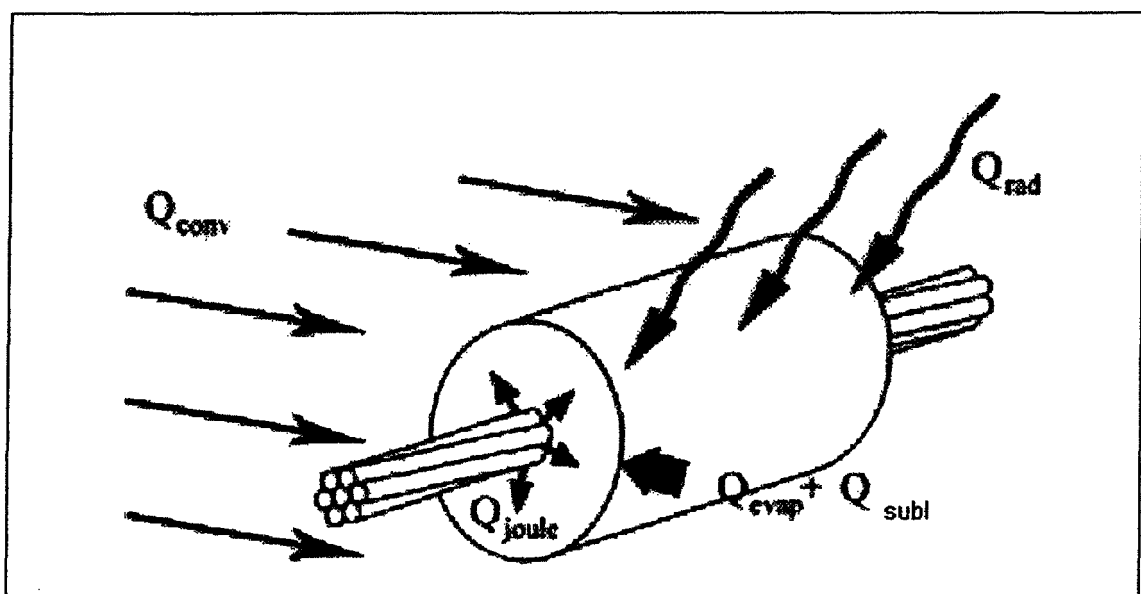


Figure 21 : bilan de chaleur sur un manchon de neige humide

Les principaux échanges thermiques, comme montré à la figure 21, correspondant au bilan d'équilibre de la douille de neige collante, qui permettent à la fonte de la neige  $Q_f$  sont : la convection  $Q_{conv}$ , la radiation  $Q_{rad}$ , l'évaporation/sublimation  $Q_{evap/subl}$  et l'effet de Joule  $Q_J$ .

$$Q_f = Q_{conv} + Q_{rad} + Q_J + Q_{evap/subl}$$

- Flux de chaleur latente

$$Q_f = L_f * \frac{dM}{dt}$$

La chaleur latente se définit comme l'énergie échangée lors d'un changement de phase d'un corps pur, l'eau dans notre cas.  $L_f$  est la chaleur latente de fusion,  $M$  étant la masse en kg et  $t$  représente le temps en s.

- Convection :

$$Q_{conv} = h * A * (T_a - T_s)$$

Une partie de la chaleur est fournie par convection : un transfert d'énergie en provenance ou à destination d'un autre objet physique par l'écoulement d'un fluide. Bien que la chaleur soit d'abord transférée entre l'objet et le fluide par conduction, l'essentiel

du transfert de l'énergie provient du mouvement du fluide. La convection correspond un principe physique de transfert de la chaleur dans un fluide par déplacement des molécules vers les zones de moindre densité.  $T_a$  et  $T_s$  correspondent, respectivement, à la température de la chambre et à la température de la neige (0 °C),  $A$  représente la surface totale de la douille de neige. Le coefficient de convection  $h$  est considéré par la suite.

- Évaporation et sublimation:

$$Q_{evap/sub} = 0.622 * \frac{L_{vap}}{C_p} * \left( \frac{Pr}{Sc} \right)^{0.63} * h * \frac{\Delta \varepsilon_w}{P} * A$$

Où  $L_{vap}$  est la chaleur latente par évaporation,  $C_p$  chaleur spécifique de l'air,  $Pr$  et  $Sc$  des nombres adimensionnels de Prandtl et Schmidt, respectivement,  $h$  le coefficient de convection,  $\Delta \varepsilon_w = Hr * \varepsilon_w(T_a) - \varepsilon_w(T_s)$  correspond à la différence des pressions de vapeur d'eau saturée à la température ambiante  $T_a$  et la température sur la douille de neige  $T_s$  (0°C) avec  $Hr$  l'humidité relative (=0.8) et  $P$  représente la pression atmosphérique (Lowe, 1976).

- Radiation :

$$Q_{courte} = (1 - \alpha) * I_{lum} * A_p$$

$$Q_{longue} = \varepsilon * \sigma * A * (T_a^4 - T_s^4)$$

L'interaction du rayonnement avec la couverture de la neige est composée de deux types : le rayonnement à onde courte (comprend la lumière visible) du soleil et les ondes longues ou rayonnement infrarouge de l'environnement. La chaleur correspondant aux ondes courtes, produite par les lampes dans les expériences, est mesurée directement sur le manteau de neige par un luxmètre,  $I_m$ , comme décrit dans la partie expérimentale, on obtient alors pour  $I_{lum}$  :

$$I_{lum} = \frac{I_m}{683 * 3.5\%}$$

Les lampes halogènes utilisées ont une efficacité lumineuse de 3.5 %. L'albédo,  $\alpha$  ( $=0.6$  pour la simulation), est le rapport de l'énergie solaire réfléchiée par une surface sur l'énergie solaire incidente. De plus, la surface  $A_p$  représente la projection de la douille soit une surface rectangulaire de longueur  $L$  et de la largeur  $D$ , le diamètre de la douille (Male, 1981). La chaleur pour les ondes de longueurs longues, produite par les murs de la chambre froide, est définie par la loi de Stefan-Boltzmann, à préciser que les températures sont à la quatrième puissance en Kelvins. Le symbole  $\varepsilon$  représente l'émissivité de la neige, avec une valeur considérée de 0.98 et  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann ( $= 5.6704 * 10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$ ).

Bien que Admirat et al. (1988), Poots (1996), Sakamoto (2000) négligent le rayonnement solaire, puisque leur modèle correspond à des conditions nuageuses, pendant l'accrétion. L'étude du rayonnement est effectuée dans le but d'évaluer les effets sur la douille de neige pour des rayonnements après l'accumulation.

- Effet de Joule :

$$Q_J = R * I^2$$

La chaleur fournie par effet de Joule est un effet thermique qui se produit lors du passage du courant électrique  $I$  dans un conducteur avec une résistance  $R$ . L'effet de Joule se caractérise par le dégagement de chaleur qui accompagne le passage du courant dans tout conducteur, donc il se manifeste par une augmentation de l'énergie interne du conducteur et généralement de sa température.

- Le coefficient de convection

Le coefficient de convection  $h$  est directement lié au nombre de Nusselt.

$$h = \frac{k_a * Nu}{D}$$

Avec :

$k_a$  : conductivité thermique de l'air W/m/K

$D$  : diamètre de la douille de neige en m

$Nu$  : nombre de Nusselt

Cependant, afin de déterminer le nombre de Nusselt, il faut considérer deux cas possibles, lorsqu'il y a ou non une présence de vent.

Dans le cas d'un vent inexistant, le nombre de Grashof ( $Gr$ ) est employé dans l'évaluer le nombre de Nusselt. Le nombre de Grashof est un nombre sans dimension, utilisé en mécanique des fluides pour caractériser la convection libre dans un fluide. Il correspond au rapport des forces de gravité sur les forces visqueuses.

On le définit de la manière suivante

$$Gr = \frac{g * \beta * (T_a - T_s) * D^3}{\nu^2}$$

Avec:

$g$  : constante gravitationnelle

$$\beta: \text{coefficient de dilatation} = \frac{1}{(T_{\text{ambiante}} + 273)/2}$$

$\nu$ : viscosité cinématique de l'air

Ainsi, le nombre de Nusselt est défini, pour ce cas (Bird, 1960):

$$Nu = 0.525 * (Gr * Pr)^{1/4}$$

Avec :

***Pr* : nombre de Prandtl**

Le nombre de Prandtl (*Pr*) est un nombre sans dimension. Il représente le rapport entre la diffusivité de quantité de mouvement  $\nu$  (ou viscosité cinématique) et la diffusivité thermique. Dans le cadre des expériences, la température variant de 1 à 5 degrés Celsius au maximum, le nombre de Prandtl vaut 0.715.

Dans le second cas, lorsqu'il y a présence de vent, le nombre de Nusselt se trouve proportionnel au nombre de Reynolds, qui est caractérisé comme le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses.

$$Re = \frac{\rho_a * U * D}{\nu}$$

Avec :

***U* : vitesse du vent en m/s**

**$\rho_a$  : Densité de l'air en kg/m<sup>3</sup>**

$$\rho_a = 1.293 * \left( \frac{273}{T_a + 273} \right)$$

Ainsi, le nombre de Nusselt est défini comme (Makkonen, 1984) :

$$Nu = 0.032 * Re^{0.83}$$

Comme il a été mentionné plus tôt, lors des expériences, il y a une présence du vent à cause du système de refroidissement. Dans les sections suivantes, le terme de vent nul est théorique, puisqu'en fait il y a toujours de la convection forcée avec un vent de 0.6 m/s.

## 4.2) La percolation de l'eau

- Flux volumique de l'eau dans les pores de la neige

Dans des conditions normales de drainage de l'eau dans la neige, le flux,  $U_w$  en cm/s, se produit sous l'influence de la gravité avec les forces capillaires ignorées. En conséquence, la forme simplifiée de la loi de Darcy peut être utilisée pour déterminer ce flux, l'équation suivante est définie par Colbeck (1972).

$$U_w = k_w * \frac{\rho_w * g}{\mu_w}$$

Avec  $g$  la gravité,

$\rho_w$  la densité de l'eau,

$\mu_w$  la viscosité de l'eau

$k_w$  la perméabilité de l'eau

- Perméabilité

La perméabilité  $k_w$  est la capacité de la neige à laisser passer un fluide, l'eau dans notre cas. Dans le cas de la neige, la perméabilité (ici en  $\text{cm}^2$ ) est généralement estimée avec la relation empirique faite par S.C. Colbeck (1972) :

$$k_w = a * S^{*2} * e^{b\phi}$$

La perméabilité est directement en fonction de la porosité  $\phi$  et d'un paramètre  $S^*$  (dépendant de la saturation, définit plus bas), ainsi que de deux constantes :  $a = 0.625 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$  (S.C. Colbeck (1972)) et de  $b = 8$  (valeur trouvée expérimentalement).

- Porosité

La porosité  $\phi$ , ( nombre adimensionnel) est le rapport du volume des pores sur le volume total, l'équation décrite par Denoth (1980) permet de quantifier la porosité dans une douille de neige.

$$\phi = 1 - \left( \frac{\rho - \Lambda * \rho}{\rho_{ice}} \right)$$

Comme nous pouvons le voir, la densité de la neige  $\rho$ , la densité de la glace  $\rho_{ice}$ , et  $\Lambda$  la LWC, interviennent dans ce processus physique qui affecte le manteau neigeux. Sa connaissance devient donc très importante pour caractériser une couverture neigeuse.

- Saturation

La saturation  $S$  est le rapport du volume d'eau sur le volume des pores.  $S_i$  représente la saturation irréductible, correspondante à un niveau de saturation de 14 % (Denoth, 1980). Le paramètre  $S^*$ , qui est fonction de la saturation et de la saturation irréductible, permet une simplification du calcul de la perméabilité :

$$S = \Lambda / \phi * (\frac{\rho_{neige}}{\rho_{eau}})$$

$$S^* = (S - S_i) / (1 - S_i), \quad si \ S > S^*$$

$$S^* = 0, \quad si \ S < S^*$$

### 4.3) Changement de géométrie

Dans cette seconde partie du modèle, on procède à une boucle qui permet, à chaque unité de temps,  $\Delta t$ , une minute, pour ce modèle, de prédire toutes les variables citées précédemment : la porosité, saturation, perméabilité et flux volumique. Ensuite, le débit (de l'eau à travers la neige),  $\dot{Q}$  en  $m^2/s$ , est calculé grâce au produit du flux volumique

par le demi périmètre du câble. La hauteur de la cavité  $y$  qui se forme sur l'extrémité, à chaque instant (Figure 22), est estimée à l'aide du débit par la relation suivante :

$$\Delta y_i = \dot{Q}_i * \Delta t / D_c$$

$$y_{i+1} = y_i + \Delta y_i$$

Avec  $D_c$  : le diamètre du câble

Dans un premier temps, il faut distinguer les deux surfaces : la partie supérieure et la partie inférieure par rapport au niveau du câble afin d'évaluer le transfert de masse qui se produit. La surface de ces deux parties est calculée mathématiquement en fonction de la hauteur de la cavité  $y$ .

$$A_h = \int_y^r \sqrt{r^2 - x^2} dx$$

L'intégrale précédente est la forme générale afin de calculer la surface d'une portion de disque. Cependant, comme le montre la figure 22, il y a l'aire du câble à soustraire, par conséquent :

$$A_h = A_t - A_c$$

Avec  $A_h$  = surface de la neige se situant dans la partie supérieure sur la section circulaire à l'extrémité de la douille de neige

$A_t$  = surface totale de la partie supérieure, neige et câble

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \int_y^r \sqrt{r^2 - x^2} dx \\
 &= 2 * \left( \frac{r^2}{2} \frac{\pi}{2} - \frac{y}{2} \sqrt{r^2 - y^2} - \frac{r^2}{2} \arctan\left(\frac{y}{\sqrt{r^2 - y^2}}\right) \right)
 \end{aligned}$$

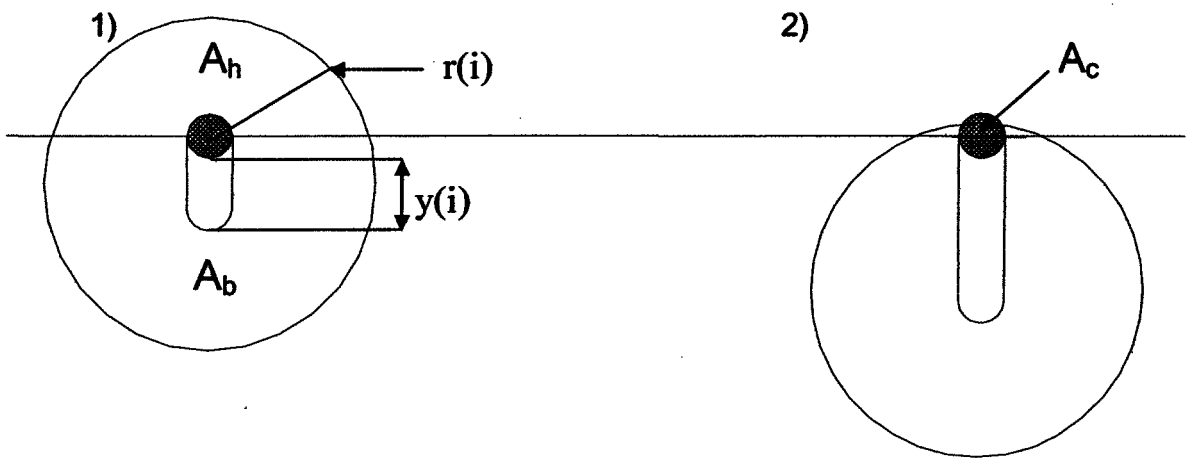
$A_c$  = surface du câble se situant dans la partie supérieure sur la section circulaire à l'extrémité de la douille de neige (voir figure 23)

Cependant, il existe deux possibilités pour le calcul de  $A_c$  : 1) la neige est présente au dessus du sommet du câble ( $y < r - r_c$ ), ou 2) le câble est au-dessus la neige ( $r - r_c < y < r$ ).

1) pour  $y < r - r_c$

La surface du câble  $A_c$  reste entière et constante tant que la cavité  $y$  reste inférieure au rayon de la douille de neige, c'est-à-dire tant que le sommet du câble se trouve au contact de la neige (Fig.22.1).

$$A_c = \frac{\pi \cdot r_c^2}{2}$$



**Figure 22 : Surface du câble selon y :**

- 1) pour  $y < r$
- 2) pour  $r - r_c < y < r$

2) pour  $r - r_c < y < r$

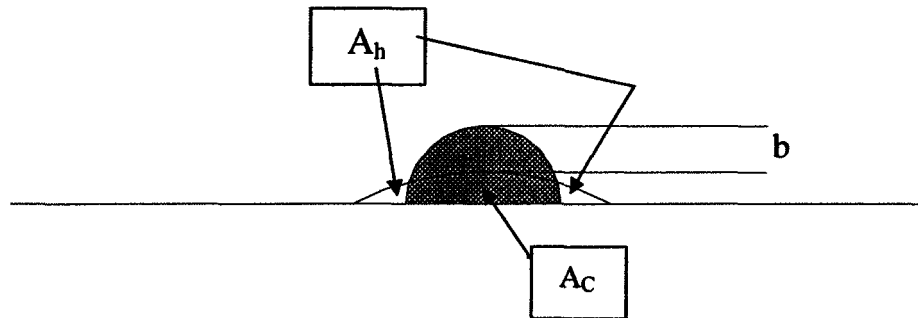
Dans ce cas, la surface du câble n'est plus entièrement recouverte par la neige, elle varie en fonction de la hauteur de la cavité. Afin d'évaluer l'intégrale générale de départ dans ce cas, trois valeurs sont à distinguer (voir figure 22.2 et 23) : (i) la surface de la neige au-dessus du centre du câble (ii) la surface du câble de hauteur b dont l'arc n'est pas en contact avec la neige (iii) et la demi-surface du câble. En soustrayant les deux derniers termes, on obtient  $A_c$ , ce qui donne :

$$A_c = \int_{r_c-b}^{r_c} \sqrt{r^2 - x^2} \cdot dx$$

$$= \frac{\pi \cdot r_c^2}{2} - 2 * \left( \frac{r_c^2 \cdot \pi}{4} - \frac{r_c - b}{2} \sqrt{r^2 - (r_c - b)^2} - \frac{r_c^2}{2} \arctan\left(\frac{r_c - b}{\sqrt{r^2 - (r_c - b)^2}}\right) \right)$$

$$b = y - (r - r_c) \text{ et } 0 \leq b \leq r_c$$

Ceci étant donné, le résultat reste une approximation puisqu'on considère que l'arc de cercle de la neige est linéaire au centre pour estimer la distance b, voir figure suivante.



**Figure 23 : agrandissement dans le cas pour :  $r - r_c < y < r$**

Par conséquent, la surface de la partie supérieure est estimée en fonction de la cavité à chaque unité de temps.

En ce qui concerne la partie inférieure, elle est calculée à l'aide de la surface supérieure et du volume de la douille. En effet, la surface de la partie inférieure correspond à la différence entre la surface totale de la douille et la surface de la partie supérieure et la surface représentée par la cavité, soit le diamètre du câble multiplié par la hauteur y.

#### 4.4) Calcul de la LWC

Puisque le modèle est bidimensionnel, toutes les valeurs sont calculées par unité de longueur. Ainsi, les volumes, les densités et la LWC sont estimés concrètement sur une longueur infinitésimale de l'extrémité de la douille de neige où à lieu de délestage. De plus, le pas de temps de chaque itération est d'une minute.

La seconde partie du modèle est basé sur trois pas : 1) la diminution du volume, 2) l'augmentation de la cavité et 3) le transfert d'eau du à la gravité.

Une des premières hypothèses fut de constater que le taux de densité augmente proportionnellement avec la LWC. Cette hypothèse fut une observation lors des expériences. Ainsi, à chaque intervalle de temps  $i$ , il est possible d'avoir le volume de la douille de neige, puisque le volume est considéré comme un cylindre, et un rayon est estimé avec  $r_{i+1} < r_i$  (pas a) à la figure 24). A chaque  $\Delta t$ , la ligne du centre du câble électrique se rapproche du sommet de la douille et par conséquent, la cavité continue d'augmenter (pas b) à la figure 24). De plus, étant donné que la masse totale de neige accumulée sur le câble reste constante et que le volume diminue, la densité se trouve à augmenter en conséquence. L'eau possédant une densité supérieure à la neige, donc l'augmentation de la densité semble logique puisqu'il y a formation d'eau liquide. Le troisième pas (c) à la figure 24) du modèle est développé plus profondément dans les sections suivantes.

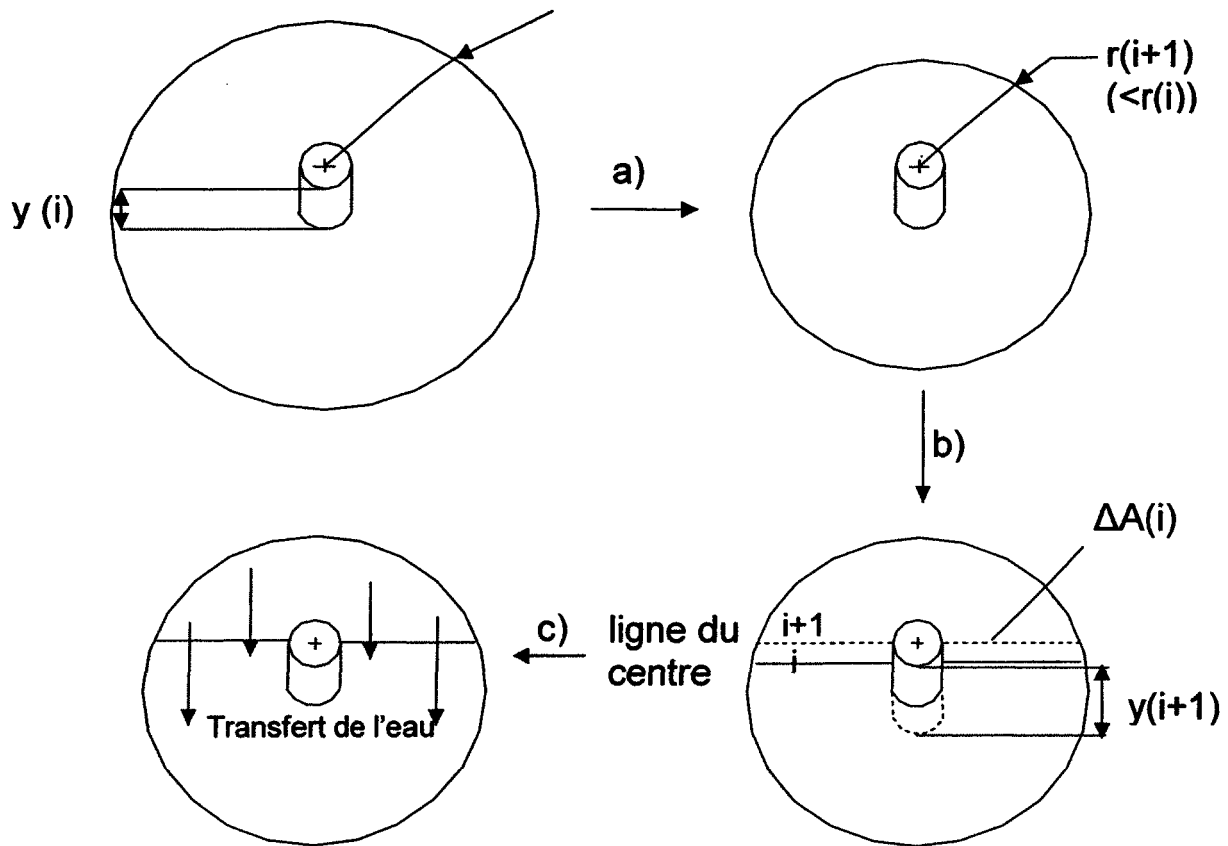


Figure 24 : Description du modèle

#### 4.4.1) Calcul des masses de la neige dans la partie supérieure et inférieure

Tous les changements de géométries et la percolation de l'eau dans la neige provoquent un transfert de masse, d'eau liquide en particulier de la partie supérieure à la partie inférieure de la douille de neige.

Le calcul des masses de la neige se réalise, aussi par itération, c'est-à-dire à intervalle de temps constant, pour les deux parties par rapport au centre du câble en suivant les

changements géométriques de la douille de neige, comme illustré à la figure 24c. La masse de neige dans la partie supérieure,  $M_H(i+1)$ , au temps  $i+1$ , correspond à la masse de neige de la partie supérieure,  $M_H(i)$ , au temps précédant  $i$ , en retranchant la masse de neige dans la section,  $\Delta A(i)$ , qui passe sous le centre du câble, et moins une quantité d'eau  $\Delta M_{\text{transfert}}$ , estimée expérimentalement.

$$M_H(i+1) = M_H(i) - \left( \frac{\Delta A(i)}{A_H(i)} \cdot M_H(i) \right) - \Delta M_{\text{transfert}}(i)$$

Étant donné que la masse totale de neige reste constante puisque la masse évaporée reste négligeable, la masse de la partie inférieure équivaut à la différence entre la masse totale de neige et la masse de neige située au-dessus du câble, ce qui correspond exactement aux gains de masses de neige perdues dans la partie supérieure.

$$M_B(i+1) = M_{\text{totale}} - M_H(i+1)$$

Le transfert d'eau  $\Delta M_{\text{transfert}}(i)$ , qui se produit à chaque  $\Delta t$  représente cette quantité d'eau qui s'écoule en raison de la gravité. L'eau s'infiltré par les pores dans la douille de neige, qui augmentent au fur et à mesure, et descend jusqu'à la partie inférieure du câble. D'après les expériences, le  $\Delta M_{\text{transfert}}(i)$  est estimé à 50 % de la masse d'eau créée dans la douille de neige collante par unité de temps.

$$\Delta M_{\text{transfert}}(i) = 0.5 \cdot \Delta M_f(i)$$

Les indices h et b indiquent la partie en haut et la partie en bas, respectivement, par rapport au centre du câble.

#### 4.4.2) Calcul des masses d'eau dans la partie supérieure et inférieure

Dans la même logique, le calcul des masses d'eau s'opère par itération pour les deux parties de la douille de neige. La masse d'eau au-dessus du câble au temps suivant,  $M_{H\_eau}(i+1)$ , équivaut à la masse d'eau au temps précédente,  $M_{H\_eau}(i)$ , ajoutée à une masse d'eau créée pendant ce laps de temps dans la neige qui est au-dessus de la ligne centrale,  $\frac{A_H(i)}{A(i)} \cdot \Delta M_f(i)$ , et en retranchant deux quantités : la masse d'eau dans la quantité de neige qui passe sous le câble entre le temps i et i+1, et la quantité d'eau qui traverse due au transfert  $\Delta M_{transfert}(i)$  :

$$M_{H\_eau}(i+1) = M_{H\_eau}(i) + \frac{A_H(i)}{A(i)} \cdot \Delta M_f(i) - \frac{\Delta A(i)}{A_H(i)} M_{H\_eau}(i) - \Delta M_{transfert}(i)$$

avec  $A(i)$  correspondant à la surface totale de la section circulaire. La quantité d'eau dans la partie inférieure est estimée, de la même façon, par l'équation suivante :

$$M_{B\_eau}(i+1) = M_{B\_eau}(i) + \left(1 - \frac{A_H(i)}{A(i)}\right) \cdot \Delta M_f(i) + \frac{\Delta A(i)}{A_H(i)} M_{H\_eau}(i) + \Delta M_{transfert}(i)$$

Une fois que la masse de neige, la masse d'eau, ainsi que les surfaces des deux parties sont connues, la LWC et la densité peuvent facilement être calculées dans les deux parties de l'extrémité de la douille de neige. Le processus de la seconde étape se répète jusqu'au moment où le volume de la partie supérieure de la douille de neige atteint la valeur nulle, signifiant l'absence de neige au-dessus du câble. Le calcul se termine, de la sorte que le délestage ait supposée.

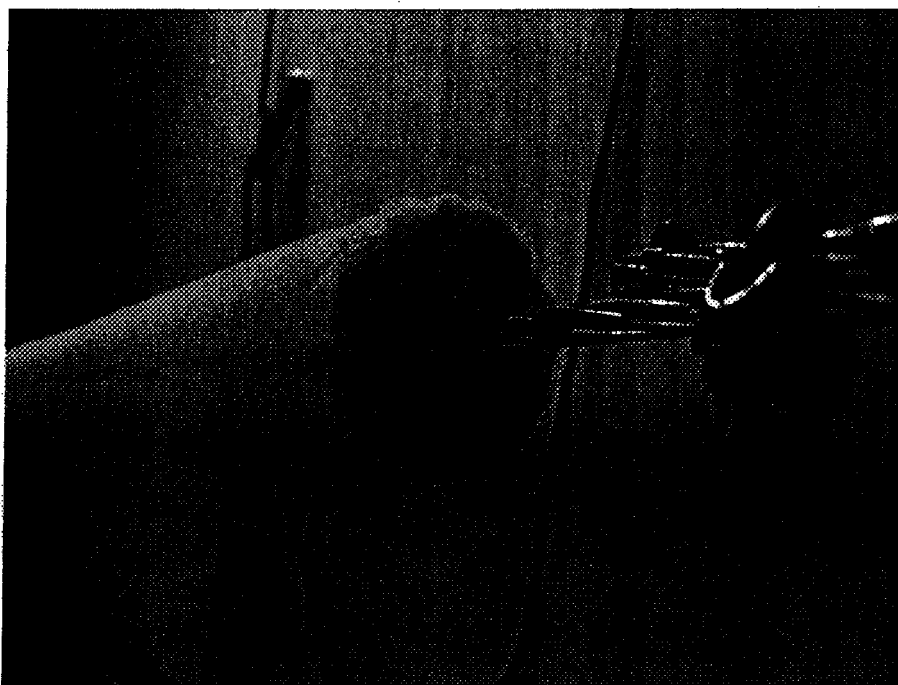
## CHAPITRE 5

### RESULTATS ET DISCUSSION

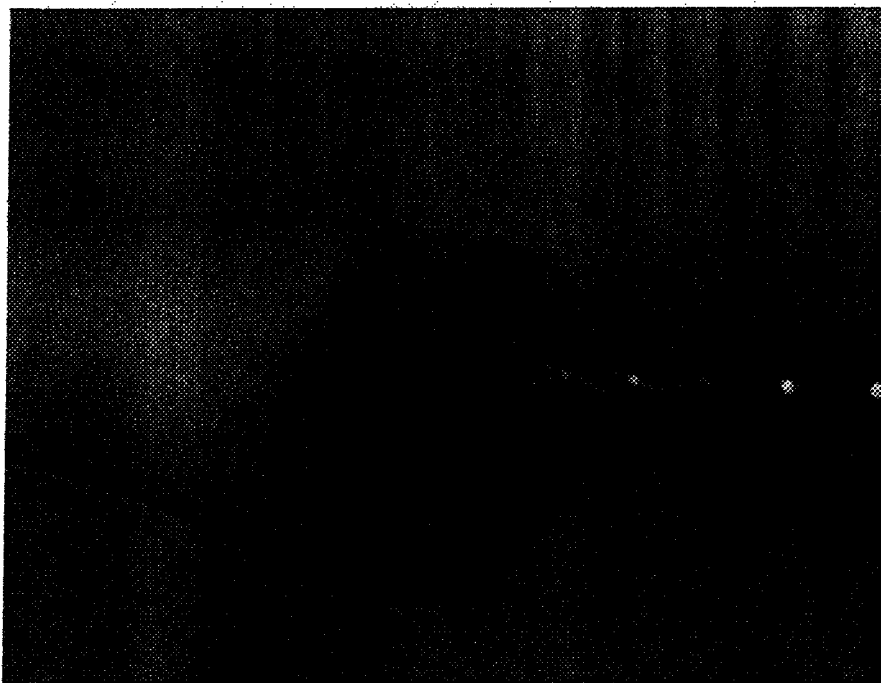
Au cours des nombreuses expériences réalisées au laboratoire, la préparation des douilles de neige collante a toujours suivi la même procédure décrite plutôt. Les douilles ont été réalisées afin d'obtenir le même diamètre, la même longueur (à l'exception pour les expériences comprenant un courant électrique, la longueur étant inférieure en raison de l'installation) : par conséquent, le même volume par unité de longueur. Cependant, la masse totale de neige, accumulée sur le câble, varie en fonction de la densité et de la LWC initiale de la neige récoltée sur le campus de l'université. Ainsi, les conditions initiales pour chaque expérience se sont avérées légèrement aléatoires. Utilisant de la neige sèche, il fut très difficile d'obtenir des conditions initiales semblables pour chaque expérience. Malgré celles-ci, les expériences pouvaient commencer lorsque les LWC initiales étaient comprises entre 8 et 20 %. Ce chapitre commence par une présentation du mécanisme du délestage, ensuite, le rôle de chacun des paramètres est mis en évidence. Pour terminer, une comparaison entre le modèle et les résultats expérimentaux est effectuée.

## **5.1) Mécanisme du délestage**

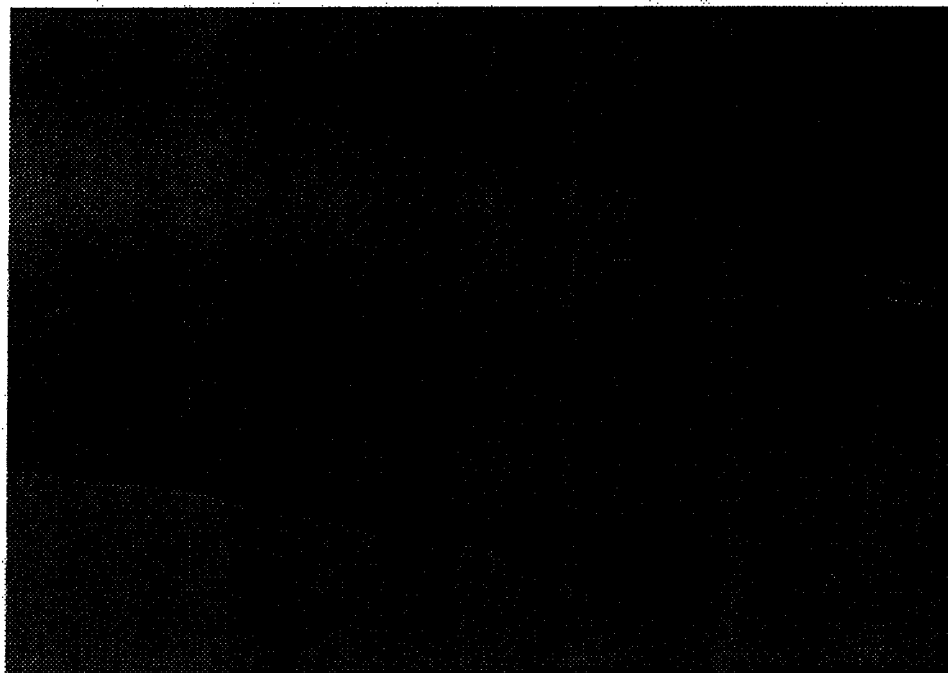
Un exemple typique de la déformation de l'extrémité de la douille de neige pendant le phénomène de délestage est montré à la figure 25. Au départ, la douille de neige est homogène ; sa circonférence est concentrique avec le câble (fig. 25a). À mesure que les échanges thermiques se produisent, l'extrémité se déplace vers le bas, et une zone de cavité apparaît au-dessous du câble (fig. 25b et 25c). Parallèlement, l'eau émigre vers le fond de la douille, et on observe que la partie inférieure de la douille devient de plus en plus transparente. En effet, dans cette section de la douille, la neige devient de plus en plus saturée en eau liquide. Les mesures réalisées, lors des expériences, ont montré que la densité et la LWC augmentent en fonction du temps, donc il y a de plus en plus la présence d'eau. Dans la partie supérieure, la densité et la LWC augmentent seulement durant les premiers instants (quelques heures ou quelques minutes selon la durée totale de l'expérience, plus précisément selon les paramètres mis en jeu), puisque lorsque la saturation dépasse les 14 %, le transfert de l'eau se produit au ralenti jusqu' à stagner, empêchant l'augmentation de la LWC. Toutefois, la section transversale demeure approximativement circulaire pendant cette déformation. Lorsque le processus est avancé, la totalité de la section à l'extrémité se trouve au-dessous du câble, et les gouttelettes d'eau peuvent se décharger de la douille de neige (fig. 25d). Cependant, cette étape se développe avec une durée très courte par rapport au processus, dans la majorité des expériences, et la perte de l'eau est négligée dans le model. Ainsi, l'expérience se termine lorsqu'il y a le déversement d'un morceau de douille de neige de longueur de 20 à 30 cm.



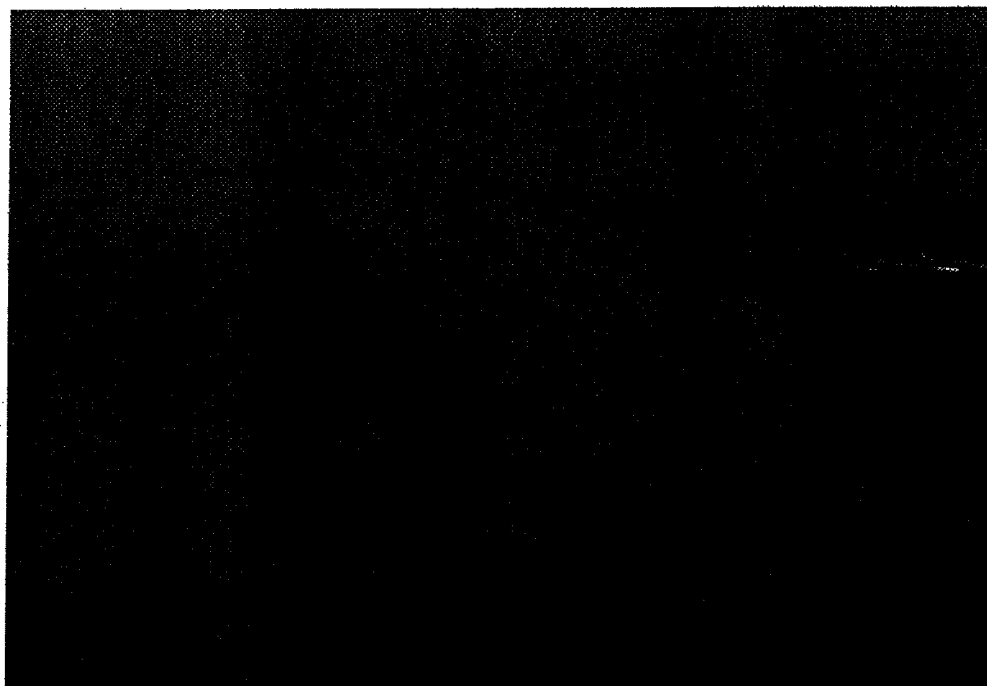
a) début de l'expérience



b) après une heure



c) après deux heures



d) après trois heures

**Figure 25 : Évolution d'une douille de neige (expérience à 5°C et un vent de 2 m/s)**

Dans quelques expériences, on remarque que la LWC n'augmente plus après une certaine valeur, mais le délestage ne se produit que quelques heures après (voir en annexe 2, figure A2.7 et A2.13). Une explication plausible est que les forces qui maintiennent le morceau qui doit se délester restent encore résistantes avec le reste de douille de neige. Par conséquent, la LWC reste légèrement constante, mais le délestage ne se produit pas. Dans ces cas, le model prédit bien la variation de la LWC, mais sous-estime le temps de délestage.

Les sections suivantes étudient les effets des paramètres mis en jeu : (i) la température de l'air, (ii) vitesse du vent (iii) rayonnement thermique, et (iv) courant électrique à travers le câble. Pendant les expériences, un bord de la douille de neige n'est jamais touché jusqu'au délestage, tandis que les LWC et la densité sont mesurées de temps en temps à l'autre extrémité de la douille.

## **5.2) Résultats expérimentaux**

Les résultats expérimentaux réalisés au cours des deux hivers 2007 et 2008 sont résumés à l'annexe 1 ; elles comprennent les conditions expérimentales, les paramètres mesurés qui sont les LWC et les densités initiales et finales, la durée des expériences, ainsi que, la tangente moyenne décrivant l'augmentation de la LWC à l'extrémité de la douille par rapport au temps. La mesure de densité exige un assez grand morceau

ininterrompu de neige qui n'était pas toujours disponible après le délestage; donc le temps entre parenthèses, apparaissant dans les tableaux pour les densités finales, indique le temps où la dernière mesure de densité a eu lieu. Selon les résultats, les valeurs les plus basses de la LWC lors du délestage de la neige ont été mesurées autour de 35 %, et pouvaient monter jusqu'à 55-60 %. L'intervalle des valeurs mesurées pour la densité finale est compris entre 0.6-0.87 g/cm<sup>3</sup>.

#### *5.2.1) Influence de la température*

Les expériences ont été réalisées avec des températures de l'air variant de 1 à 5 °C. La figure 26 et le tableau 3 présentent comment l'augmentation de la température de l'air accélère le processus de délestage en montrant l'évolution de la LWC. La température influence directement la quantité de chaleur par convection. Par conséquent, plus la température ambiante est plus élevée, plus le transfert de chaleur entre la douille de neige et l'air ambiant est important, ce qui accélère la fonte de neige. La durée du délestage de la neige est fonction avec la température de l'air, c'est-à-dire que la LWC augmente plus rapidement vers les valeurs critiques de délestage avec une température de l'air plus élevée, et le délestage se produit plus tôt. Par exemple pour la série d'expériences avec une vitesse de vent allant à 4 m/s, présentée au tableau suivant, selon différentes températures, on peut constater que la durée et la tangente des courbes est directement en fonction de la température. La tangente des courbes correspondantes à la

variation de la LWC en fonction du temps est accentuée pour des températures plus hautes.

CONDITIONS			LWC initiale (%)	DENSITE initiale (g/cm <sup>3</sup> )	LWC finale (%)	DENSITE finale (g/cm <sup>3</sup> )	Temps de délestage (h)	tangente moyenne (% / h)
T. (°C)	V. (m/s)	RAY. (lx)						
1	4	0	12,43		26,52		5h30	4,107
2	4	0	14,16	0,50	56,81	0,79 (5h)	5h30	5,7
3	4	0	12,31	0,58	46,77		3h15	10,08
5	4	0	23,18	0,58	49,61	0,64 (2h)	3h	13,33

Tableau 3 : Rôle de la température

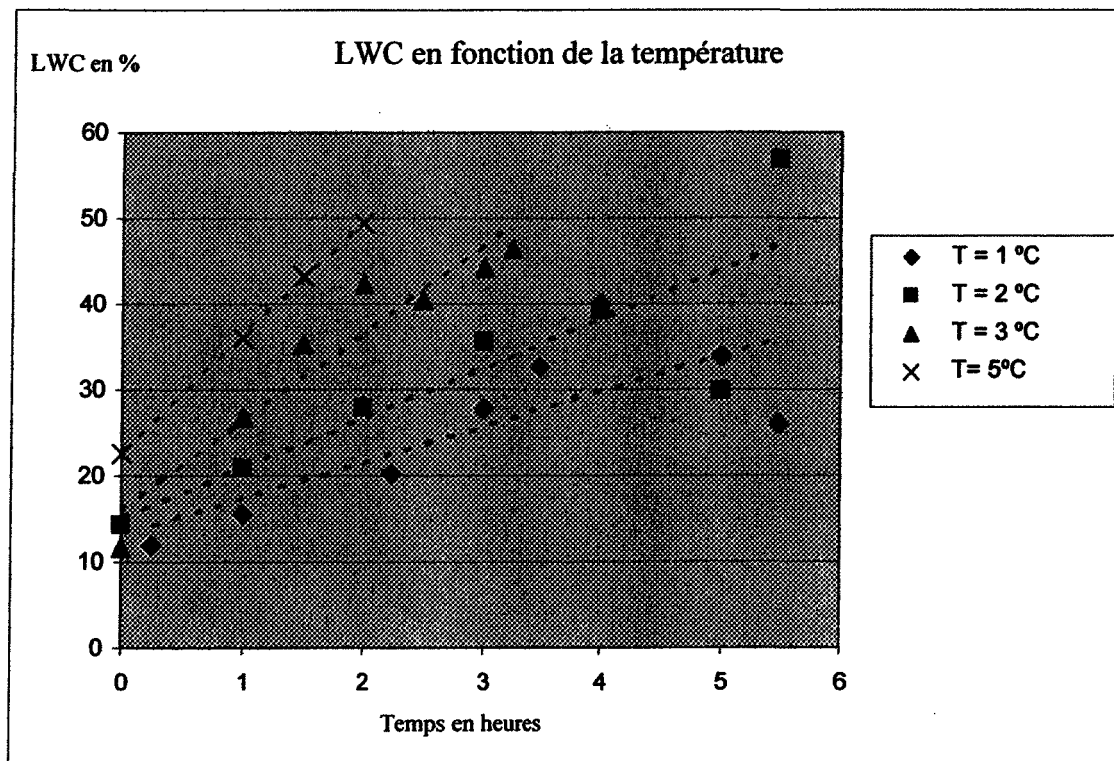


Figure 26 : Variation de la LWC en fonction de la température

### 5.2.2) Influence de la vitesse du vent

Les expériences réalisées ont permis de mettre en évidence le rôle du vent pour des vitesses allant jusqu'à 15 km/h. Le vent, comme décrit dans le bilan thermique, est une variable atmosphérique qui entre directement dans le calcul du coefficient de convection. De même que les observations faites pour la température, le vent possède un effet sur la durée du délestage et l'accélération de l'augmentation de la LWC. Comme on peut le voir sur la figure 27, l'effet de la vitesse du vent est très significatif, et loin d'être négligeable. La tangente moyenne des courbes, telle que la figure 27, est accentuée avec l'augmentation de la vitesse du vent, qui accroît les échanges thermiques par convection. Le tableau 4 présente les résultats des expériences faites à 5 °C afin d'observer l'influence du vent.

CONDITIONS			LWC initiale (%)	DENSITE initiale (g/cm <sup>3</sup> )	LWC final (%)	DENSITE finale (g/cm <sup>3</sup> )	Temps de délestage (h)	tangente moyenne (% / h)
T. (°C)	V. (m/s)	RAY. (lx)						
5	0	0	16,299		55,78		6h45	6,08
5	2	0	20,168		59,58		3h40	9,96
5	4	0	23,180	0,575	49,61	0,64 (2h)	3h	13,33

Tableau 4 : Rôle de la vitesse du vent

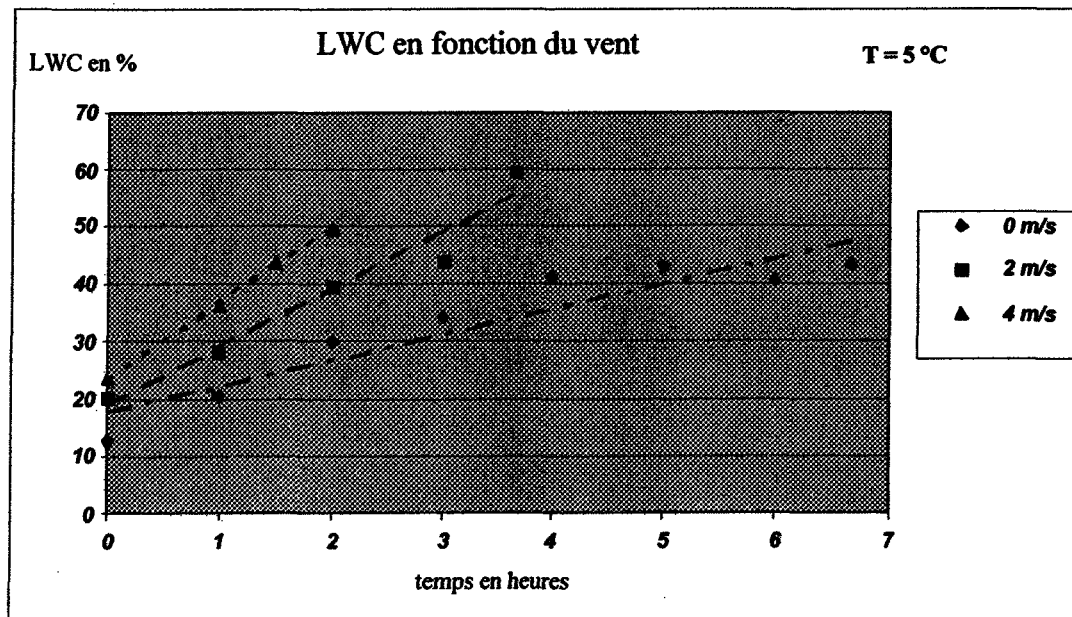


Figure 27 : Variation de la LWC en fonction de la vitesse du vent

### 5.2.3) Influence du rayonnement

Les rayonnements thermiques ont été simulés par des lampes halogènes. Malheureusement, l'intensité lumineuse, exprimée en Lux (représentant la quantité de lumens par  $m^2$ ), mesurée directement sur les douilles de neiges par un luxmètre est assez faible pour pouvoir obtenir des conclusions intéressantes. Cependant, comme le montre la figure 28, on peut observer une légère différence de temps pour le délestage avec une augmentation de l'intensité lumineuse. Cependant, une double intensité lumineuse, correspondant à 900 lux équivalant à des conditions nuageuses (voir annexe 3), permet de réduire le temps de délestage et accentue la tangente moyenne. De plus, dans des conditions pour une journée ensoleillée, la quantité de chaleur fournie peut être

supérieure à des transferts par convection à une température de 3 °C, dans ce sens, le rayonnement n'est pas négligé.

CONDITIONS		LWC initiale (%)	DENSITE initiale (g/cm <sup>3</sup> )	LWC finale (%)	DENSITE finale (g/cm <sup>3</sup> )	temps de délestage (h)	tangente moyenne (% / h)
T. (°C)	RAY. (lx)						
3	0	12,95	0,51	33,71	0,83	7h20	2,27
3	450	8,53	0,41	43,22		7h45	4,52
3	900	11,84	0,54	36,29	0,71	4h00	6,13

Tableau 5 : Rôle de l'intensité lumineuse.

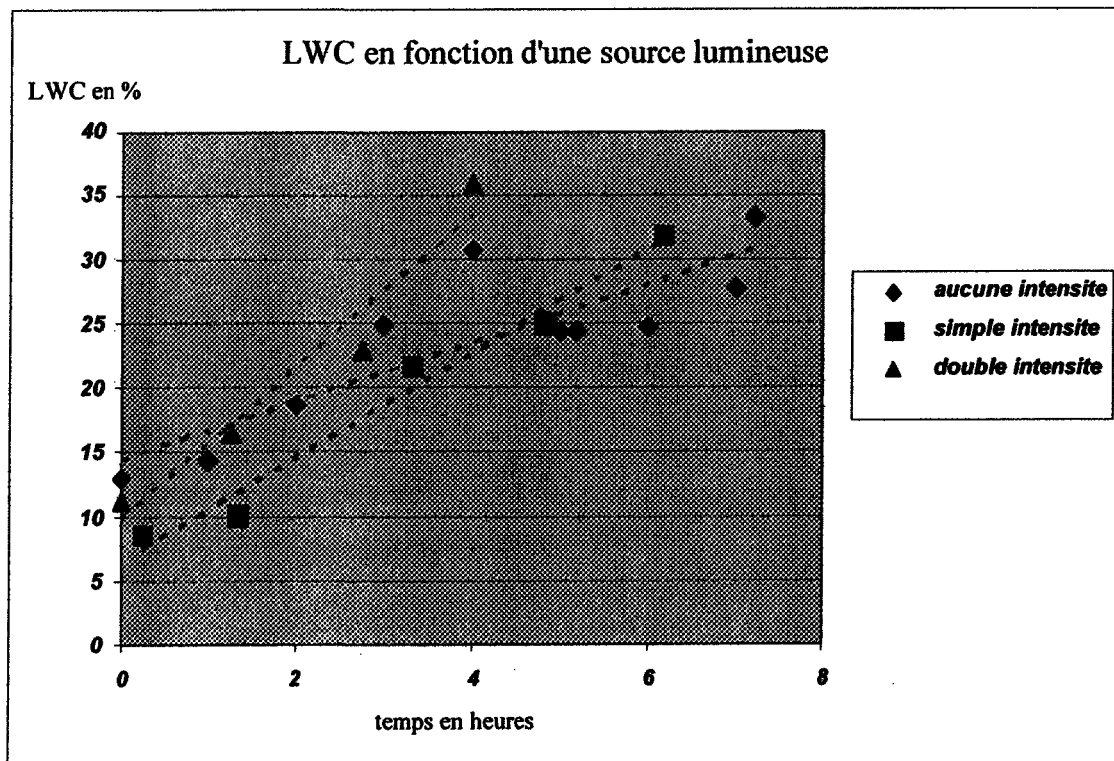


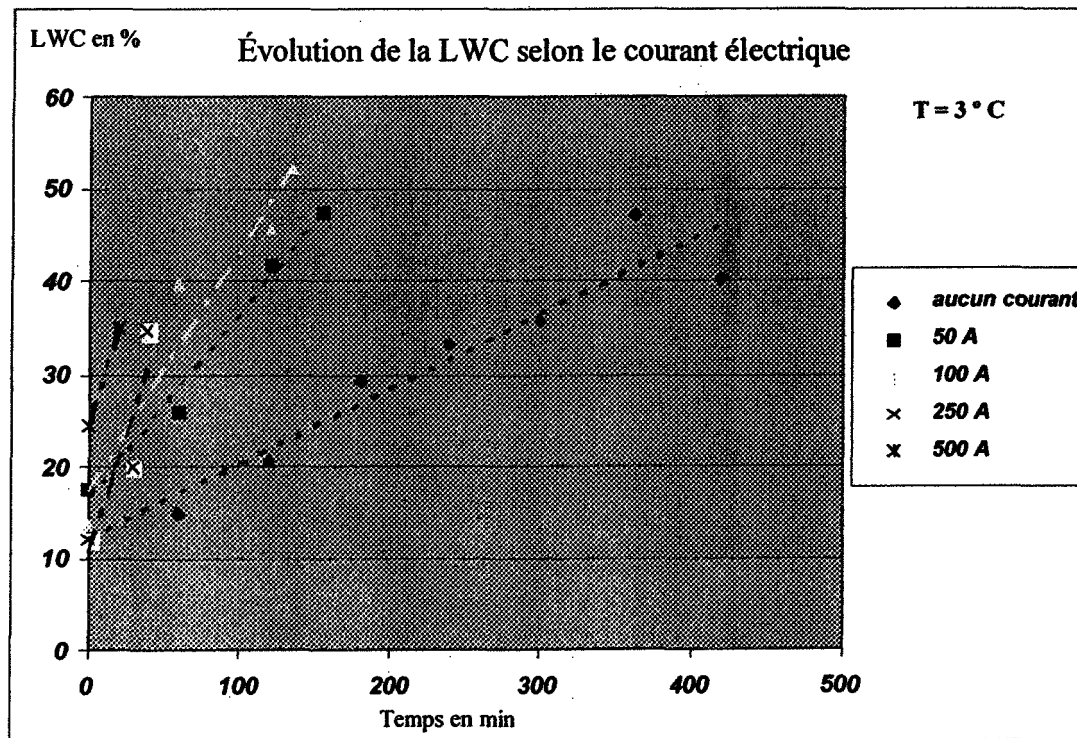
Figure 28 : Variation de la LWC en fonction de la luminosité

#### 5.2.4) Influence du courant électrique

Le courant électrique, dernier paramètre étudié, produit une chaleur due à l'effet thermique sur un conducteur parcouru par un courant. Le temps de délestage diminue de façon importante pour les expériences avec un courant électrique, c'est-à-dire le transfert thermique émis par effet de joule accélère la variation de la LWC. Les autres paramètres deviennent négligeables dans le bilan thermique, lorsque le courant électrique dépasse les 100 A. Les observations ont permis de remarquer que la cavité formée avec le transfert de masse due à la gravité se produit sur toute la longueur de la douille de neige. Ainsi comparativement aux autres paramètres, la chaleur émise permet la fonte de neige directement autour du câble agissant sur toute la longueur de la douille. De même que les autres paramètres, le temps de délestage diminue avec l'augmentation de l'intensité du courant. La température autour du câble peut atteindre plusieurs degrés selon l'intensité du courant, ce qui accentue la fonte de neige et la cavité formée au-dessous du câble. Le tableau 6 et la figure 29 présentent les résultats expérimentaux avec une température ambiante de 3 °C, selon différents courants électriques. De même, on s'aperçoit que la tangente s'accroît avec l'augmentation du courant électrique.

CONDITIONS		LWC initiale (%)	DENSITE initiale (g/cm <sup>3</sup> )	LWC finale (%)	DENSITE finale (g/cm <sup>3</sup> )	Temps de délestage (h)	tangente moyenne (% / h)
T. (°C)	I (A)						
3	0	12,95	0,51	33,71	0,83	7h20	2,27
3	50	17,51	0,42	47,4	0,65 (2h)	2h35	12
3	100	13,63	0,51	52,11	0,75 (2h)	2h15	15.6
3	250	12	0,33	34,65	0,43 (0h30)	0h40	30
3	500	24,41	0,62	34,8		0h20	31.2

Tableau 6 : Rôle du courant électrique



**Figure 29 : Variation de la LWC selon le courant électrique**

### **5.3) Comparaison entre les expériences et le modèle théorique**

Le modèle théorique, décrit dans le chapitre 4, est appliqué pour plusieurs conditions différentes, et les résultats obtenus sont comparés avec ceux des expériences dans les sections suivantes. La simulation reprend les mêmes conditions initiales que celles aux expériences, qui sont les paramètres ambiants (la température de l'air, la vitesse du vent, l'intensité lumineuse et le courant électrique), la densité initiale et la LWC initiale de la neige. Les mesures de la LWC et de la densité sur l'extrémité de la douille de neige sont

également tracées dans les figures suivantes. Dans de nombreuses expériences, deux échantillons de neige ont été prélevés à chaque prise de mesure de la LWC, une à partir du dessus et une autre dans la moitié inférieure de la douille de neige. Dans la suite, les termes LWC\_h (pour en haut) et LWC\_b (pour en bas) correspondent à la LWC dans la partie supérieure et dans la partie inférieure, respectivement, afin de ne pas alourdir le texte. De plus, dans les figures présentées par la suite, les points correspondent aux résultats expérimentaux, et les lignes discontinues correspondent aux simulations.

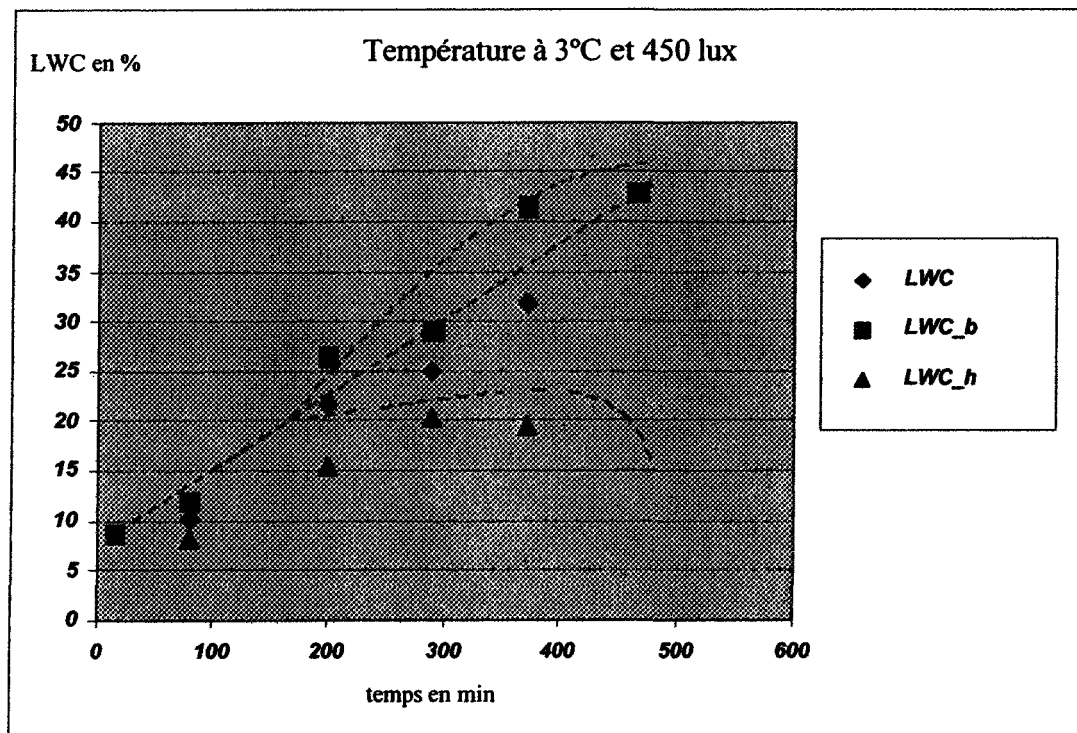
### *5.3.1) Estimation de la LWC*

Au début de la plupart des expériences, la LWC augmente dans la même proportion partout dans la douille de neige, parce que les grains de glace commencent à fondre uniformément dans toute la douille, mais la percolation de l'eau ne se produit pas encore, la neige se trouve en mode funiculaire. Lorsque la saturation dépasse les 14 %, la neige se trouve dans un régime transitoire entre le funiculaire et le pendulaire, la percolation commence en entraînant le transfert de masse. À mesure que la LWC augmente, le mouvement de l'eau vers le fond de la douille de neige est facilité, et les mouvements de l'extrémité de la douille de neige commencent en direction du dessous du câble. Après un certain temps, l'augmentation de la LWC\_h ralentit, et en même temps, elle s'accélère dans la partie inférieure. À la fin de l'expérience, la partie supérieure disparaît et la LWC\_b rejoint la LWC moyen de la section entière, puisque,

maintenant, l'extrémité de la douille de neige se retrouve complètement au-dessous du câble.

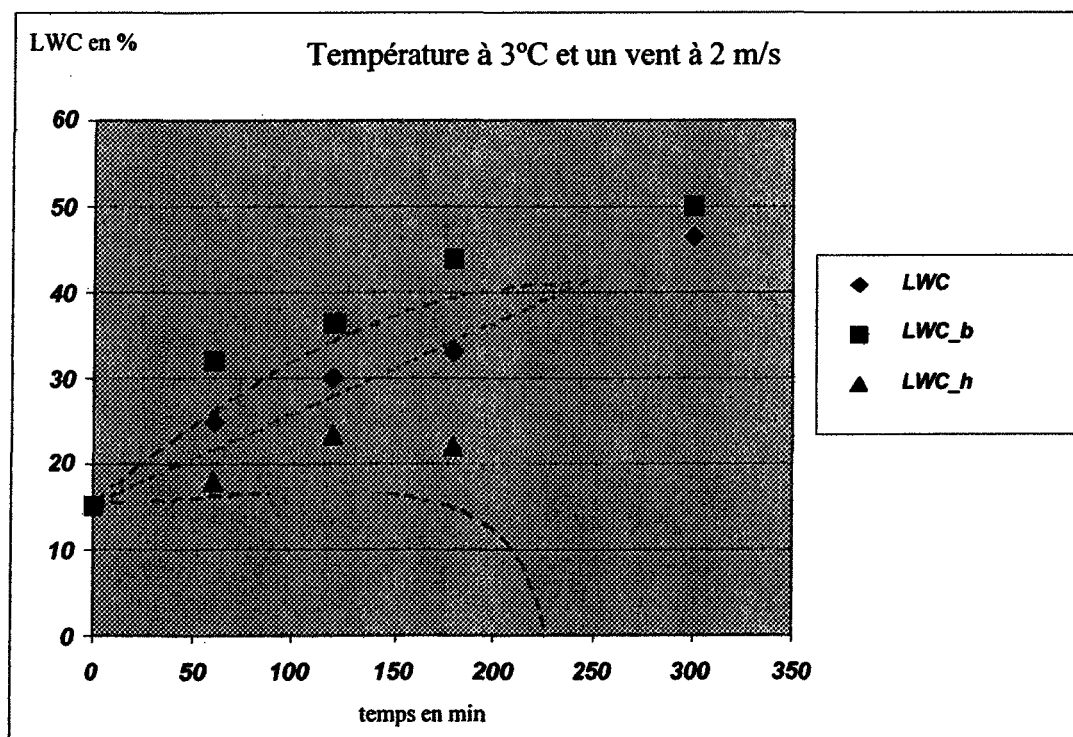
Dans les trois prochaines figures, une comparaison est faite en variant la vitesse du vent et l'intensité lumineuse avec une température de l'air constante (3 °C).

La figure 30 présente les résultats de la simulation et de l'expérience à 3 °C et 450 lux. On retrouve les trois zones déterminées, précédemment : (i) LWC, LWC\_h et LWC\_b varient identiquement pendant les premières minutes de l'expérience (ii) transfert de masse se produit et (iii) LWC\_b se confond avec LWC.



**Figure 30 : Température à 3°C et une lampe à 450 lux**  
(Lignes discontinues : simulation, points : mesures expérimentales)

Dans la figure 30, nous pouvons voir que l'écart entre la simulation est au maximum à environ  $\pm 5\%$  de la valeur expérimentale.



**Figure 31 : Température à 3°C et un vent de 2 m/s.**  
(Lignes discontinues : simulation, points : mesures expérimentales)

Pour l'expérience avec les conditions présentées à la figure 31, la percolation de l'eau se passe dès le début de la simulation et de l'expérience, puisque, dès le départ de l'expérience la saturation est de 19 %, soit supérieur à la saturation irréductible.

Les figures suivantes présentent quelques comparaisons simulation/expérience dans plusieurs conditions atmosphériques différentes.

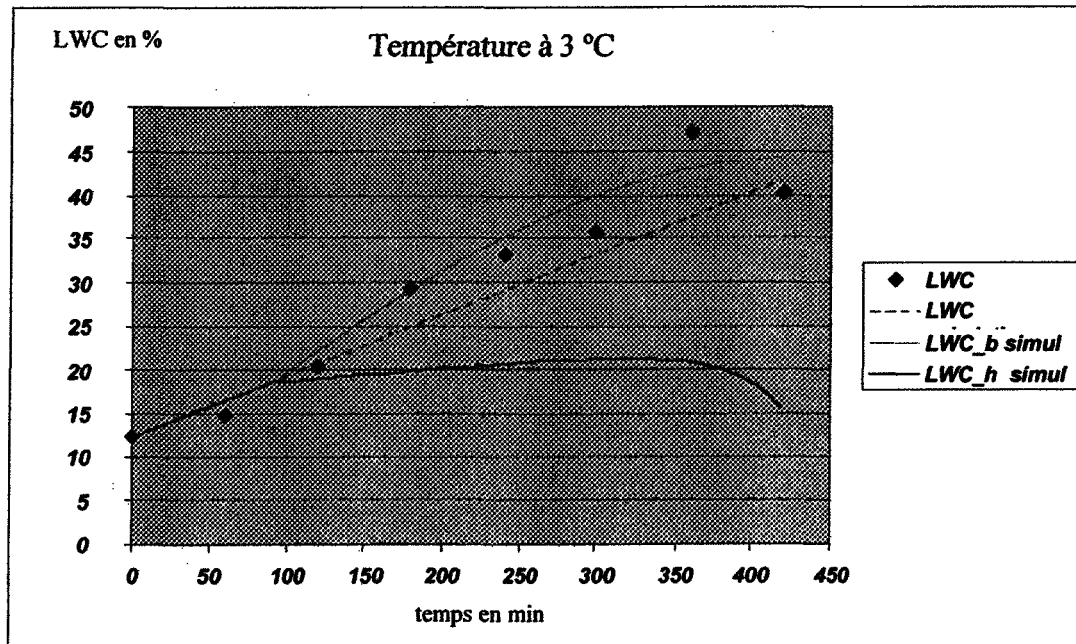
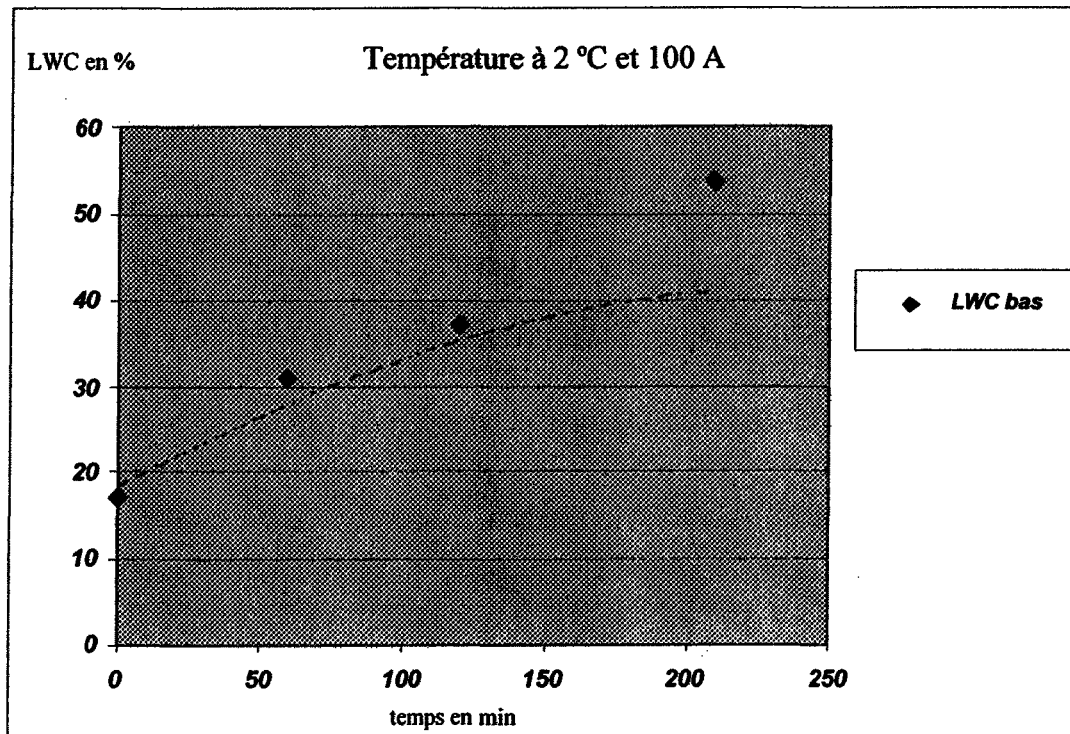
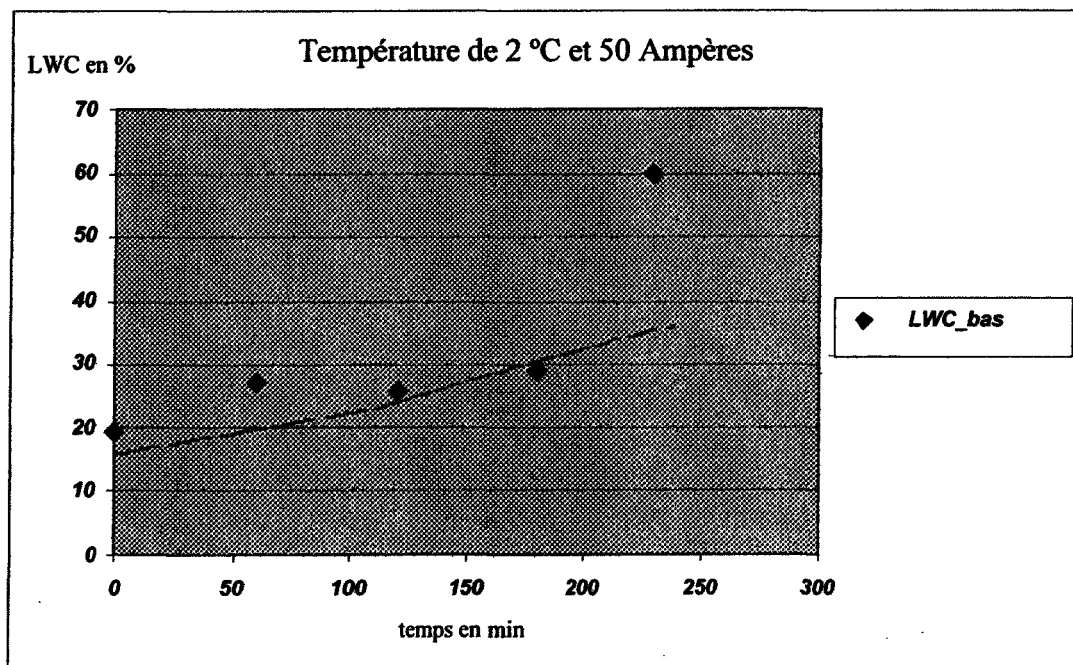


Figure 32 : Température à 3°C.  
(Lignes discontinues : simulation, points : mesures expérimentales)



**Figure 33 : Température à 2°C et un courant de 100 Ampères**  
(Lignes discontinues : simulation, points : mesures expérimentales)



**Figure 34 : Température à 2°C et un courant de 50 Ampères**  
(Lignes discontinues : simulation, points : mesures expérimentales)

Pour les expériences avec du courant électrique, les expériences n'ont pas permis de mesurer la LWC<sub>h</sub> (voir Fig. 33 et 34), puisque la douille de neige se retrouve au dessous du câble rapidement. De plus, le montage mis en place à l'aide de la génératrice subissait des pertes de l'ordre de 10 % du courant désiré, ce qui provoque d'assez grandes différences entre les expériences et la simulation pour des intensités de courant élevées. Ainsi, le modèle est valide simplement pour un courant allant jusqu'à 100 Ampères. Malgré le fait qu'une série d'expériences de 250 A a été faite avec les trois températures, et une expérience de 500 A à 3 degrés Celsius (voir annexe 2).

### *5.3.2) Estimation de la densité*

Le modèle permet, en obtenant la masse et le volume de la neige à chaque instant, d'estimer la variation de la densité de celle-ci en considérant le transfert de masse, comme la variation de la LWC selon les paramètres en fonction du temps. Les variations de la densité pour la section entière, dans les parties supérieures et inférieures sont tracées et comparées aux résultats expérimentaux dans les figures suivantes. On constate des effets similaires entre la variation de la densité aux variations de la LWC, en effet, les densités entre la partie supérieure et inférieure augmente de la même façon, puis elles se séparent comme pour les changements de la LWC.

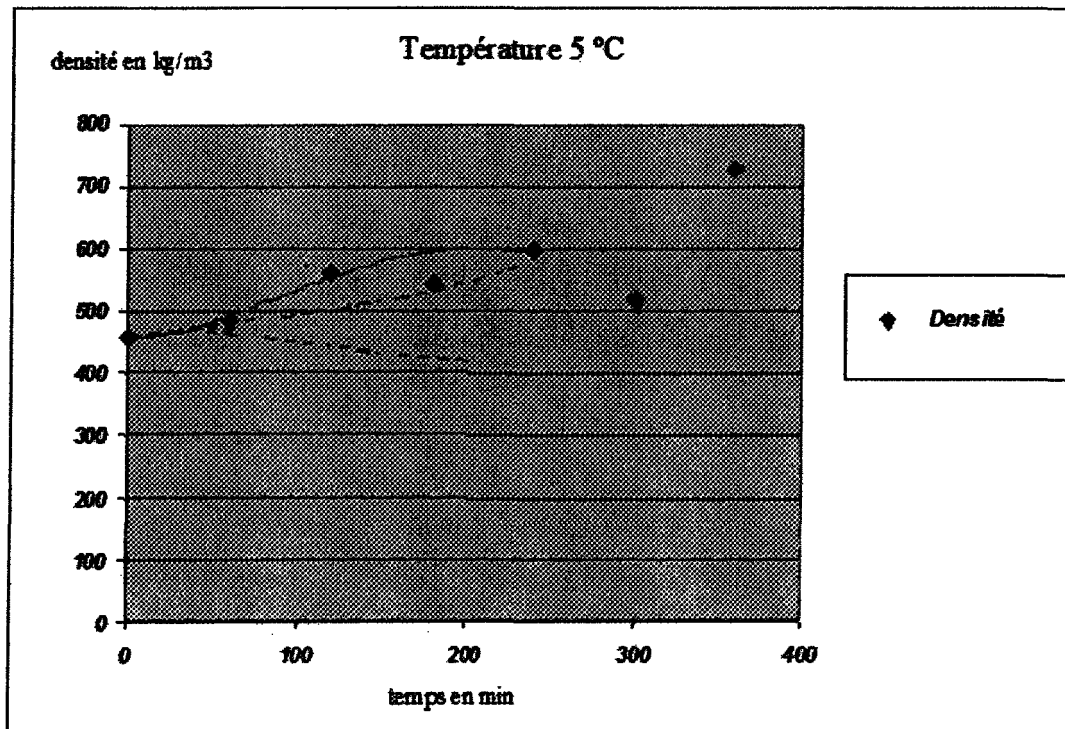


Figure 35 : Variation de la densité de la neige ( $T = 5\text{ °C}$ )  
(Lignes discontinues : simulation, points : mesures expérimentales)

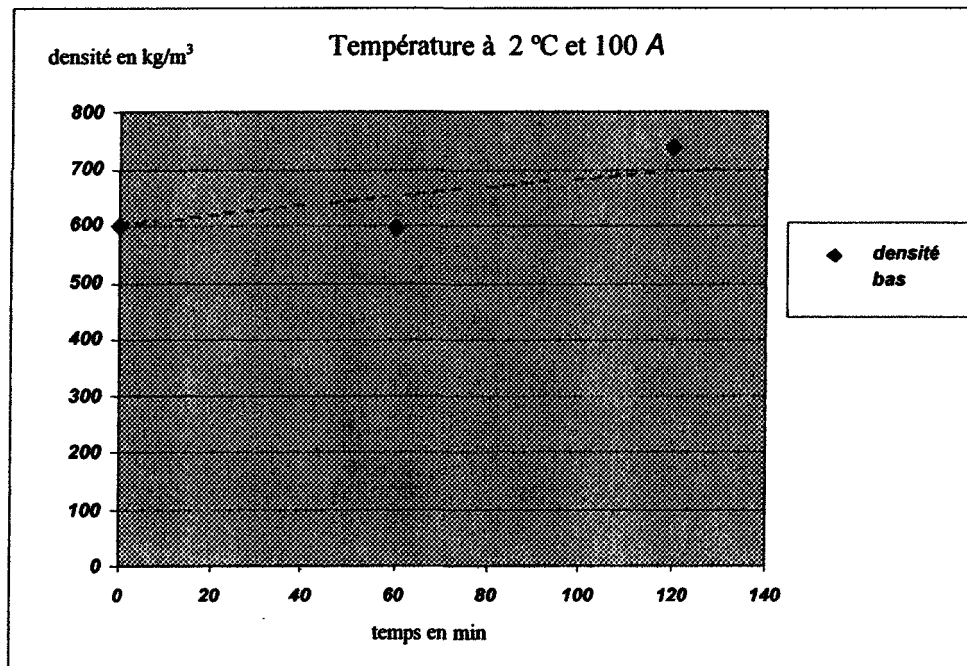
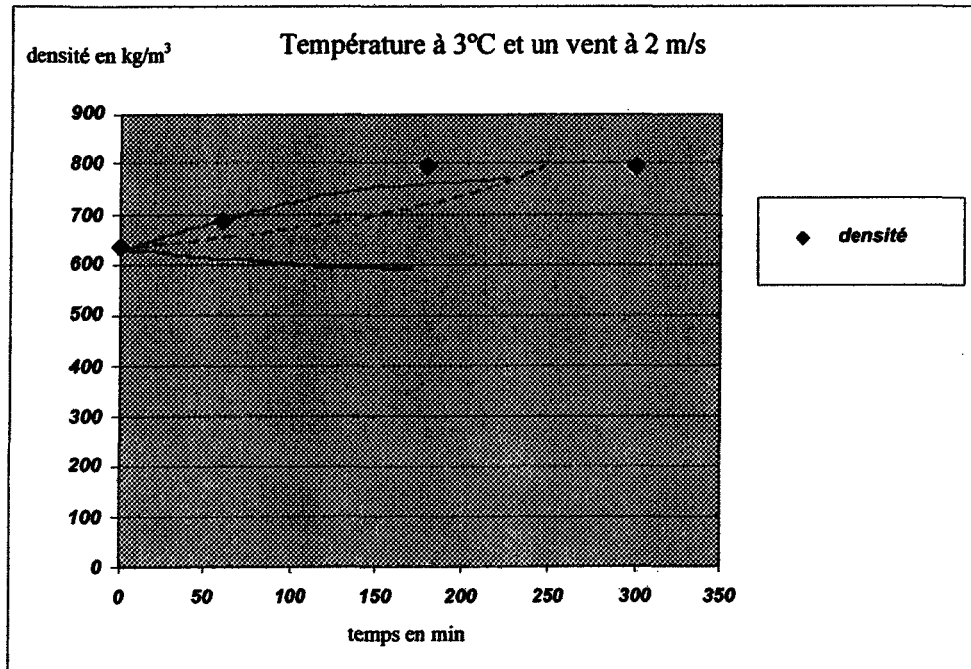


Figure 36 : Variation de la densité de la neige ( $T = 2\text{ °C}$  et  $I = 100\text{ A}$ )  
(Lignes discontinues : simulation, points : mesures expérimentales)



**Figure 37 : Variation de la densité ( $T = 3^{\circ}\text{C}$  et vent de 2 m/s)**  
(Lignes discontinues : simulation, points : mesures expérimentales)

Cependant, on peut constater des petits écarts entre les résultats de la simulation et ceux de l'expérience. Ces différences peuvent trouver leur origine sur le temps de mesure de la densité et de la LWC. Puisqu'en règle générale, l'expérience présente une LWC légèrement supérieure à la simulation. En effet, le temps de la manipulation pour la prise de mesure de la densité continue à la fonte de la neige augmentant ainsi la LWC et la densité de la neige.

### 5.3.3) Estimation de la masse d'eau et de la masse totale dans la douille de neige

De même, le modèle permet d'estimer les masses totales, c'est-à-dire l'eau, la glace et l'air, et les masses d'eau dans les parties supérieures (Masse d'eau en haut) et inférieures (Masse d'eau en bas) de la douille de neige en fonction du temps. Les figures suivantes présentent quelques résultats.

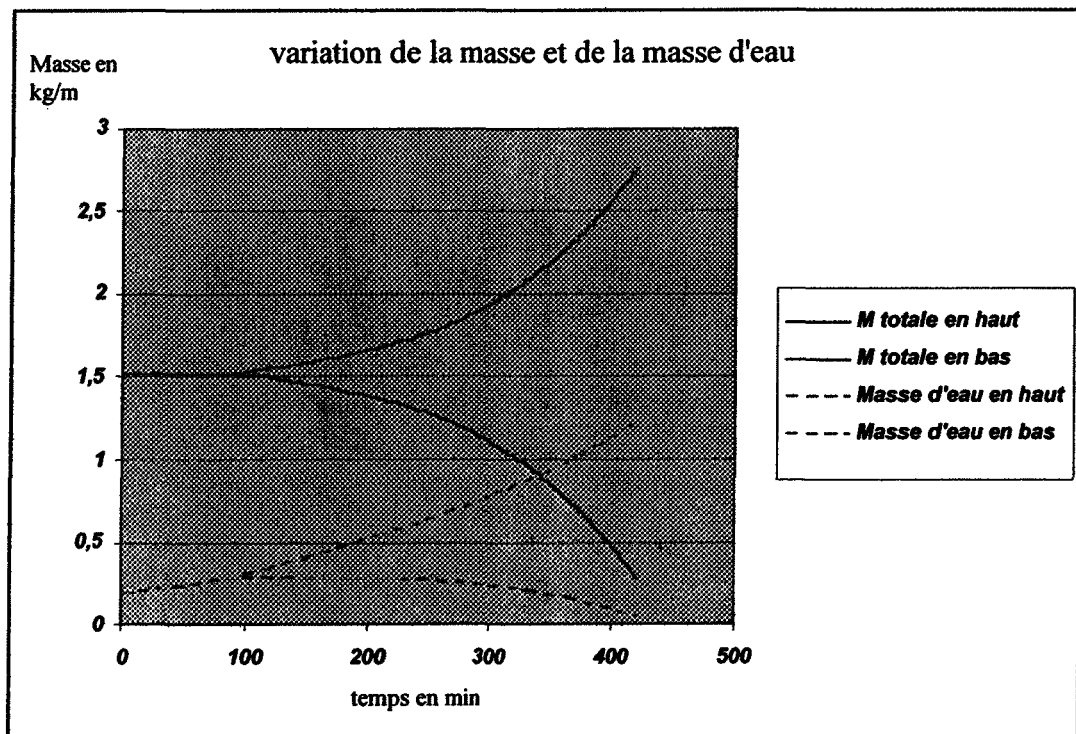
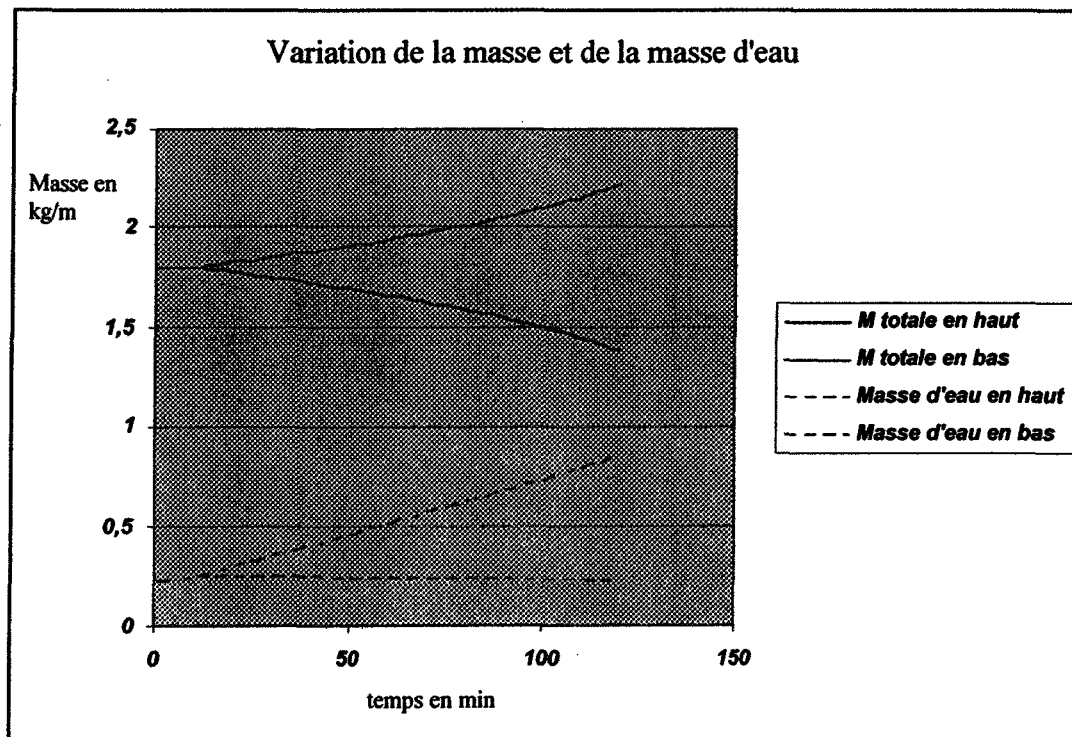
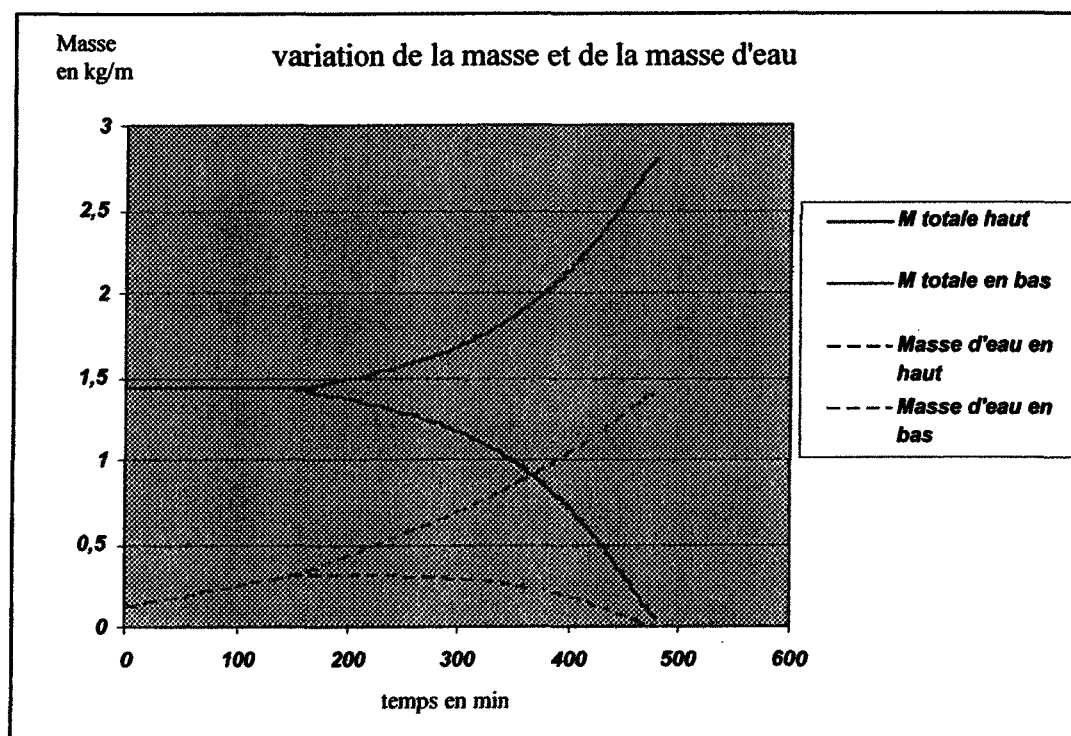


Figure 38 : Température à 3°C.



**Figure 39 : Température à 5°C et un courant de 50 Ampères**



**Figure 40 : Température à 3°C et une lampe.**

Une première observation peut être effectuée, au départ les masses varient de la même façon dont elles se situent dans la partie supérieure ou inférieure par rapport au câble, comme il a déjà été mentionné, le transfert se produit simplement pour une saturation d'eau supérieure à 14 %. Par conséquent, au départ, la masse totale (eau + glace + air) reste identique, ensuite la masse d'en bas augmente au détriment de la masse d'en haut. La somme de deux masses reste constante et il s'agit de la masse totale accumulée par unité de longueur. Le phénomène se produit également pour la masse d'eau, cependant, on peut constater l'augmentation de la masse d'eau dès les premiers instants, malgré l'absence de transfert de masse, car la glace fond tout de même. Ensuite, le transfert se produit et la masse d'eau dans la partie supérieure diminue puisqu'elle migre vers la partie inférieure.

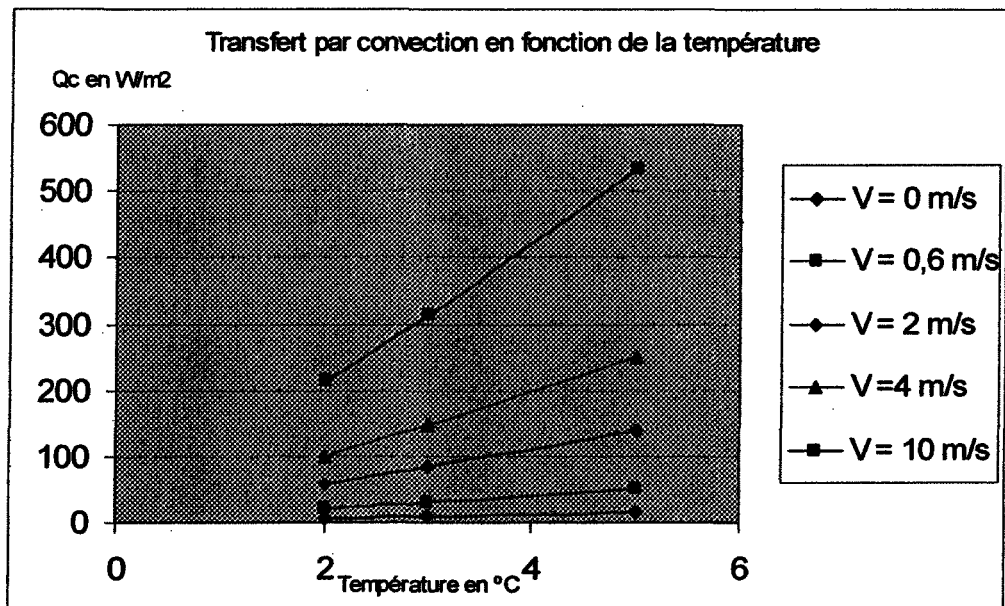
#### 5.3.4) Estimation de la quantité de chaleur

Les différents termes dans l'équilibre thermique rendent une comparaison qualitative possible entre les différentes sources de chaleur. Le tableau 7 expose la contribution de la chaleur fournie par convection selon la température de l'air et la vitesse de vent en jeu. Les deux figures suivantes (42 et 43) et le tableau 7 montrent que l'augmentation de la température de l'air et/ou de la vitesse du vent accroisse l'apport de chaleur par convection.

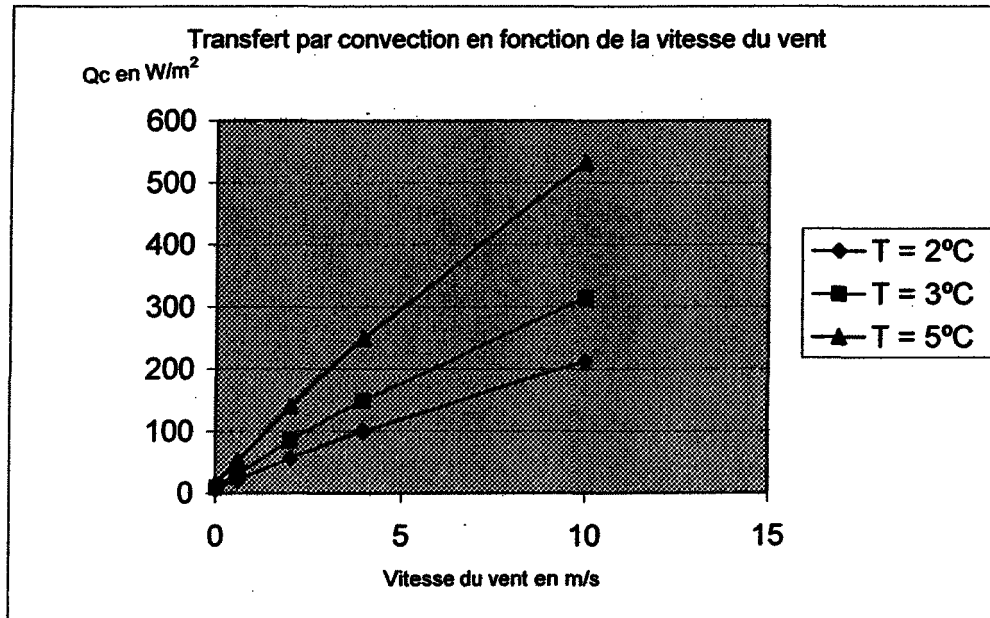
$Q_{conv}$ (W/m <sup>2</sup> )		Temperature en °C		
		2	3	5
VITESSE DU VENT en m/s	0	6	9	15
	0,6	21	31	52
	2	56	84	140

	4	100	149	249
	10	213	314	533

**Tableau 7 : Quantité de chaleur par convection**



**Figure 41 : Quantité de chaleur fournie par convection selon la température de l'air.**



**Figure 42 : Quantité de chaleur fournie par convection selon de la vitesse du vent**

Étant donné que la radiation à onde longue reste assez faible (voir annexe 3), une comparaison de la quantité de chaleur fournie par le rayonnement à onde courte a été faite. On constate que les expériences réalisées en laboratoire ne produisent pas beaucoup de chaleur pour le rayonnement à onde courte (tableau 8). Cependant, on peut remarquer que pour une journée d'hiver ensoleillée, la quantité de chaleur peut atteindre  $417 \text{ W/m}^2$  (Atmospheric Environment Service, 1984), ce qui est une quantité de chaleur non négligeable, même supérieure une quantité de chaleur par convection sans vent allant jusqu'à plus de  $3^\circ\text{C}$ . Ainsi, le modèle prend en considération la chaleur par rayonnement puisqu'elle peut être importante dans la nature.

condition	450 lux	900 lux	journée d'hiver ensoleillée
-----------	---------	---------	-----------------------------

$I_{lum} \text{ ( W/m}^2 \text{ )}$	19	38	417
$Q_r \text{ (W)}$	0,72	1,4	16

**Tableau 8 : Quantité de chaleur par rayonnement à onde courte**

Le courant électrique est, l'un des principaux paramètres, qui permet l'accélération de la fonte de la neige. Cependant, on peut constater, qu'un courant électrique de 50 A fournit moins de chaleur que celle transmise par convection pour des conditions météorologiques avec un vent allant à 10 m/s, en comparant les tableaux 7 et 9. Bien évidemment, comme la quantité de chaleur par effet de Joule est proportionnelle à la carrée du courant électrique, plus le courant électrique est augmenté et plus la chaleur fournie à la neige augmente.

Courant électrique (A)	0	50	100	250
$Q_j \text{ (W)}$	0	4,22	16,88	105,47

**Tableau 9 : Quantité de chaleur par effet de Joule**

## CHAPITRE 6

### CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le délestage de la neige collante d'un câble suspendu avec un fléchissement négligeable dans des conditions d'accumulations de neige collante a été étudié expérimentalement et numériquement dans le cadre de ce mémoire de maîtrise. De nombreuses expériences ont dû être faites durant les deux hivers 2007 et 2008 afin d'obtenir une base de données sur les changements de la teneur en eau liquide (LWC) et de la densité en fonction des quatre paramètres considérés : la température de l'air, la vitesse du vent, le rayonnement solaire et le courant électrique dans le câble. Les effets de ces paramètres sont les principales raisons de la fonte de neige, provoquant l'augmentation de l'eau liquide dans la douille de neige. Tant que l'eau n'est pas continue dans les pores, la fonte de neige se produit de façon homogène dans toute la douille de neige. Par la suite, le transfert de l'eau se réalise par percolation, ensuite la section à l'extrémité se déplace au-dessous du câble jusqu'à ce que la neige se déleste, lorsque les forces externes dépassent les forces adhésives et cohésives. En parallèle à l'étude expérimentale, un modèle thermodynamique a été développé à partir des équations de transfert de chaleur. La simulation a permis de prédire la variation de la teneur en eau liquide et de

la densité dans la section circulaire sur l'extrémité de la douille de neige selon les paramètres mis en jeu, jusqu'au délestage. Le modèle prend en compte la teneur en eau liquide initiale des flocons de neige, la densité de la neige, la température de l'air, la vitesse du vent, l'intensité lumineuse du rayonnement des lampes halogènes et le courant électrique dans le câble. Les hypothèses suivantes étaient établies afin de simplifier le modèle :

- La simulation et les expériences sont réalisées lorsque l'accumulation de neige est terminée.
- Le câble est supposé horizontal, puisque la flèche du câble est négligée.
- Les paramètres atmosphériques restent constants durant chaque expérience.
- La perte de matière, en particulier de l'eau liquide, est négligée.
- Le délestage est considéré, dans la simulation, lorsque la douille de neige se trouve au-dessous de la ligne centrale du câble.

## **6.1 Conclusions**

Au terme de notre étude, nous pouvons conclure que :

- Le délestage se produit sur l'extrémité de la douille de neige, cette observation est sûrement due aux effets d'extrémités. La surface d'échanges de chaleur étant plus grande, c'est aux extrémités que la LWC atteint les valeurs de délestage dans un premier temps. Par contre pour un câble ayant une flèche non

négligeable, le transfert de l'eau se produirait vers le milieu de la douille et pourrait commencer le délestage à cet endroit.

- Le délestage se réalise lorsque la LWC est comprise entre 35 et 60 %.

Ces observations regroupent la littérature : Admirat et autres (1986), Poots et Skelton (1994) , Poots et Skelton (1995).

- Plus la LWC initiale est élevée, plus le délestage est rapide, par contre plus la densité initiale de la douille de neige est élevée, plus la douille va résister au délestage. (même observation faite par Roberge (2006))

- La vitesse du vent et le courant électrique accélère davantage le processus de fonte de la neige en eau liquide, par conséquence, le temps de délestage de la douille de neige.

- La température de l'air et le rayonnement solaire deviennent importants dans la fonte de neige lorsque leurs valeurs augmentent. Pour des températures supérieures à 3 °C ou des rayonnements avec un ciel ensoleillé, la fonte de neige devient aussi importante qu'avec du vent ou du courant électrique.

- Le courant électrique permet le glissement de la douille de neige par rapport au câble sur toute sa longueur, la cavité est créée sur toute la longueur

contrairement aux autres paramètres, cependant, elle reste plus importante sur les extrémités.

- Les résultats obtenus par la simulation selon les paramètres correspondent bien avec les expériences.

## **6.2 Recommandations**

Avec les conclusions qui précèdent, nous pouvons dire que les objectifs désirés sont atteints, puisque les résultats de notre modèle sont en accord avec la majorité des résultats expérimentaux. Toutefois, le modèle présente des limites, c'est pourquoi nous recommandons :

- Développer un modèle tridimensionnel sur les changements de LWC sur toute la longueur de la douille de neige. Ce modèle devra être capable de prédire les variations des autres paramètres de la neige tels que la densité, la porosité, la perméabilité.
- Réaliser des expériences en variant un seul paramètre au cours de l'expérience, en particulier des changements de températures de positive à négative, puis de nouveau positive, afin d'étudier les variations de la LWC dans

ces conditions. Cette situation apparaît régulièrement dans la nature et elle est plus représentative de la réalité.

- Une étude du délestage sur un câble fléchi, correspondant à la réalité.
- Déterminer l'influence de la longueur, du diamètre et de la torsion du câble sur les forces d'adhésions entre la neige et le câble.
- Une étude du point de vue microscopique pour la percolation de l'eau, et déterminer numériquement le transfert de masse.
- Une répétitivité des expériences pour calculer la moyenne et l'écart type des résultats obtenus.
- Faire des mesures sur le terrain, pour valider le modèle, en particulier la quantité de chaleur par rayonnement pour des journées ensoleillées comparativement aux résultats expérimentaux.

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 serait un apport important dans la recherche sur le délestage de la neige collante.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Admirat, P. et Maccagnan, M. 1985. Observation des épisodes de neige collante sur les lignes électriques. EDF-DER HM/72-5287.
- Admirat, P. et Lapeyre, J.L., 1986. Observation d'accumulation de neige collante à la station de Bagnères de Luchon les 6, 7 avril 1986 - Effet préventif des contrepoids antitorsion, EDF-DER HM/72-5535.
- Admirat, P., Sakamoto, Y., Lapeyre, J.L. et Maccagnan, M., 1986. Quantitative results and proposed mechanisms on wet snow accretion in the Ishiuchi wind-tunnel. Proc. of 3rd International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Vancouver, BC, Canada, pp.155-160.
- Admirat, P. et Sakamoto, Y., 1988. Wet snow on overhead lines: state-of-art. Proc. of 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Paris, France.
- Admirat, P., Lapeyre, J.L. et Dalle, B., 1990. Synthesis of Filed Observations and Practical Results of the 1983-1990 "Wet-Snow" Programme of Electricité de France, Proc. of 5th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Tokyo, Japan, pp. B6-2-(1) - B6-2-(5).
- Admirat, P., Maccagnan, M. et Goncourt, B.D., 1988. Influence of Joule effect and of climatic conditions on liquid water content of snow accreted on conductors, Proc. of 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Paris, France.

- Atmospheric Environment Service, 1984. Monthly Radiation Summary, 25. Environment Canada.
- Bird, R.B., Stewart, W.E. et Lightfoot, E.N., 1960. Transport Phenomena. John Wiley & Sons Inc., New York, NY, USA.
- Colbeck, S.C., 1972. A Theory of Water Percolation in Snow. *Journal of Glaciology*, 11(63): 369-385.
- Colbeck, S.C. et Ackley, S.F., 1982. Mechanisms for ice bonding in wet snow accretions on power lines. *Proc. of the first International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Hanover, New-Hampshire, USA.
- Denoth, A., 1980. The Pendular-Funicular Liquid Transition in Snow. *Journal of Glaciology*, 25(91): 93-97.
- Eliasson, A.J. et Thorsteins, E., 1996. Wet snow icing combined with strong wind, *Proc. of 7th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*,.
- Eliasson, A.J. et Thorsteins, E., 2000. Field Measurements of Wet Snow Icing Accumulation, *Proc. of 9th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*, Chester, England.
- Farzaneh, M., 2008. Atmospheric icing of power networks. Springer, 381 p.
- Grenier, J.C., Admirat, P. et Maccagnan, M., 1985. Théorie et modélisation de la formation des manchons de neige collante. EDF-DER HM/72-5288.

- Grenier, J.C., Admirat, P. et Maccagnan, M., 1986. Theoretical Study of the Heat Balance during the Growth of Wet Snow Sleeves on Electrical Conductors, Proc. of 3rd International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Vancouver, BC, Canada, pp. 125-129.
- Kondratyev, K.Y., 1969. Radiation in the Atmosphere. Academic Press, New York, NY.
- Lowe, P.R., 1976. An Approximating Polynomial for the Computation of Saturation Vapor Pressure. Journal of applied meteorology.
- Makkonen, L., 1984. Modeling of Ice Accretion on Wires. Journal of Climate and Applied Meteorology, 23(6): 929-938.
- Makkonen, L., 2000. Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures. The Royal Society, 358: 2913-2939.
- Male, D.H. et Grey, D.M., 1981. Snowcover Ablation and Runoff. In: D.M. Grey and D.H. Male (Editors), Handbook of Snow. Pergamon Press, Toronto, ON.
- Poots, G. et Skelton, P.L.I., 1994. Simple models for wet-snow accretion on transmission lines: snow load and liquid water content. International Journal of Heat and Fluid Flow, 15(5): 411-417.
- Poots, G. et Skelton, P.L.I., 1995. Thermodynamic models of wet-snow accretion: axial growth and liquid water content on a fixed conductor. International Journal of Heat and Fluid Flow, 16(1): 43-49.
- Poots, G., 1996. Ice and snow accretion on structure. Research Studies Press (England) and John Wiley and Sons Inc., New York, NY, USA, 330 p.

- Roberge, M., 2006. A Study of Wet Snow Shedding from an Overhead Cable, McGill University, Montreal, QC.
- Roberge, M., Farzaneh, M., McClure, G. et Peyrard, C., 2007. Wet Snow Shedding from on Overhead Cable Part 1: Experimental Study. Proc. of 12th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures.
- Roberge, M., Farzaneh, M., McClure, G. et Peyrard, C., 2007. Wet Snow Shedding from on Overhead Cable Part 2: Evaluating the Dynamic Response of a Cable Subjected to Wet Snow Shedding. Proc. of 12th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures.
- Sakamoto, Y., 2000. Snow accretion on overhead wires. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 358: 2941-2970.
- Sakamoto, Y., Admirat, P., Lapeyre, J.L. and Maccagnan, M., 1988. Thermodynamic simulation of wet snow accretion under wind-tunnel conditions, Proc. of 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Paris, France, pp. Paper A6.6.
- Sakamoto, Y., Tachizaki, S. et Sudo, N., 2005. Snow Accretion on Overhead Wires, Proc. of 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Montreal, QC, Canada, pp. 3-9.
- Shugo, M., Okamoto, M. et Oura, H., 2002. Experimental examination on snow accretion characteristics on transmission lines. Proc. of the 10th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures.
- Wakahama, G., Kuroiwa, D. et Goto, K., 1977. Snow Accretion on Electric Wires and its Prevention. Journal of Glaciology, 19(81): 479-487.

## Annexe 1

### RECAPITULATIF DES EXPERIENCES

Les tableaux suivants sont un récapitulatifs des expériences réalisées en hivers 2007 et 2008.

CONDITIONS			LWC initiale (%)	DENSITE initiale (g/cm <sup>3</sup> )	LWC finale (%)	DENSITE finale (g/cm <sup>3</sup> )	Temps de délestage (h)	tangente moyenne (% / h)
T	V	L						
1	0	0	36,67		48,28		8h00	2,29
2	0	0	28,88	0,55	45,76	0,87	13h00	1,09
2	0	0	15,79	0,46	44,54	0,75	7h10	3,46
3	0	0	12,19	0,44	40,19		7h00	4,85
3	0	0	12,95	0,51	33,71	0,83	7h20	2,27
5	0	0	16,30		55,79		6h45	6,08
5	0	0	12,52	0,46	43,10	0,73	6h40	4,44
2	2	0	9,34	0,67	42,51	0,87	7h	3,44
2	2	0	13,01	0,58	54,40		7h40	2,57
3	2	0	18,86	0,54	35,56	0,70	6h40	2,50
3	2	0	15,21	0,64	49,96	0,80	5H00	5,88
5	2	0	19,61		59,59		3h40	9,96
1	4	0	11,81		26,52		5h30	4,11
2	4	0	14,16	0,50	56,81	0,79	5h30	4,03
3	4	0	12,31	0,58	46,77		3h15	10,08
5	4	0	23,18	0,58	49,61	0,64	2h	13,33
2	0	s	9,95	0,42	41,90	0,60	3h25	8,22
2	0	s	7,09	0,35	42,70	0,41	3h25	10,12
3	0	s	8,53	0,41	43,22		7h45	4,52
5	0	s	24,64	0,59	49,49	0,60	3h10	7,90
2	0	d	9,70	0,54	44,81		7h40	4,60
3	0	d	23,63	0,53	36,16	0,75	2h00	7,15
3	0	d	11,84	0,54	36,29	0,71	4h00	6,13
5	0	d	27,62	0,54	44,21	0,82	3h50	4,73
5	0	d	16,00	0,52	47,50	0,68	2h50	10.1

Tableau A1.1 : récapitulatifs des expériences avec conditions naturelles

LWC initiale : correspond à la teneur en eau liquide au temps 0.  
 DENSITE initiale : correspond à la densité au temps 0.  
 LWC finale : correspond à la teneur en eau liquide lors du délestage.  
 DENSITE finale : correspond à la densité lors du délestage.  
 Temps de délestage : durée totale de l'expérience.  
 Tangente moyenne : taux d'augmentation de LWC.  
 T : température de l'air en °C.  
 V : vitesse du vent en m/s.  
 L : rayonnement.  
 I : intensité du courant électrique en Ampères.  
 « s » : luminosité correspondant à 450 lux  
 « d » : luminosité correspondant à 900 lux.

CONDITIONS				LWC initiale (%)	DENSITE initiale (g/cm <sup>3</sup> )	LWC finale (%)	DENSITE finale (g/cm <sup>3</sup> )	Temps de délestage (min)	tangente moyenne (% / min)
T	V	L	I						
2	0	0	50	19,46	0,39	59,96	0,63 (210 min)	230 min	0,14
3	0	0	50	17,51	0,42	47,40	0,65 (150 min)	155 min	0,20
5	0	0	50	12,10	0,42	42,01	0,61 (90 min)	95 min	0,32
2	2	0	50	16,03	0,43	44,47	0,54 (120 min)	140 min	0,18
3	2	0	50	13,44		48,40		60 min	0,58
5	2	0	50	17,97	0,42	47,53	0,61 (90 min)	110 min	0,27
2	4	0	50	24,35	0,61	58,45	0,76	210 min	0,14
3	4	0	50	11,65	0,54	33,23	0,60 (120 min)	155 min	0,12
5	4	0	50	15,16	0,58	62,01	0,69	90 min	0,50
2	0	d	50	12,92	0,45	45,30	0,54 (90 min)	105 min	0,29
2	0	d	50	10,42	0,28	22,00	0,43	90 min	0,13
3	0	d	50	20,95	0,55	35,29	0,79	120 min	0,12
3	0	d	50	12,98		21,27		60 min	0,13
5	0	d	50	13,70	0,67	54,60		135 min	0,25
2	0	0	100	16,94	0,60	53,73	0,74	210 min	0,17
3	0	0	100	13,63	0,51	52,11	0,75 (120 min)	135 min	0,26
5	0	0	100	18,79	0,41	33,11	0,72	120 min	0,09
2	0	0	250	8,02	0,40	31,45	0,47 (30 min)	55 min	0,42
5	0	0	250	18,41	0,57	34,89	0,54	60 min	0,27
3	0	0	250	12,00	0,33	34,65	0,43	40 min	0,50
3	0	0	500	24,41	0,62	34,80		20 min	0,52

**Tableau A1.2 : récapitulatifs des expériences avec courant électrique**

## Annexe 2

### COMPARAISON EXPERIENCES/SIMULATION

Toutes les figures suivantes correspondent à une comparaison entre les résultats expérimentaux (les points) et ceux obtenus par simulation (les lignes discontinues).

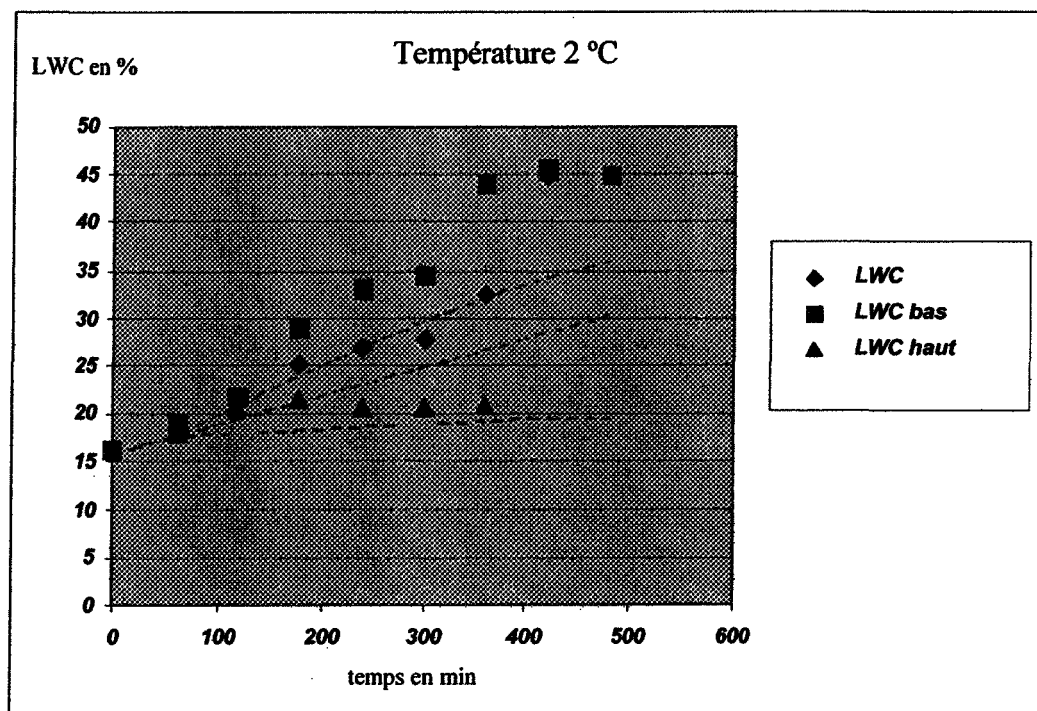


Figure A2.1: T = 2°C

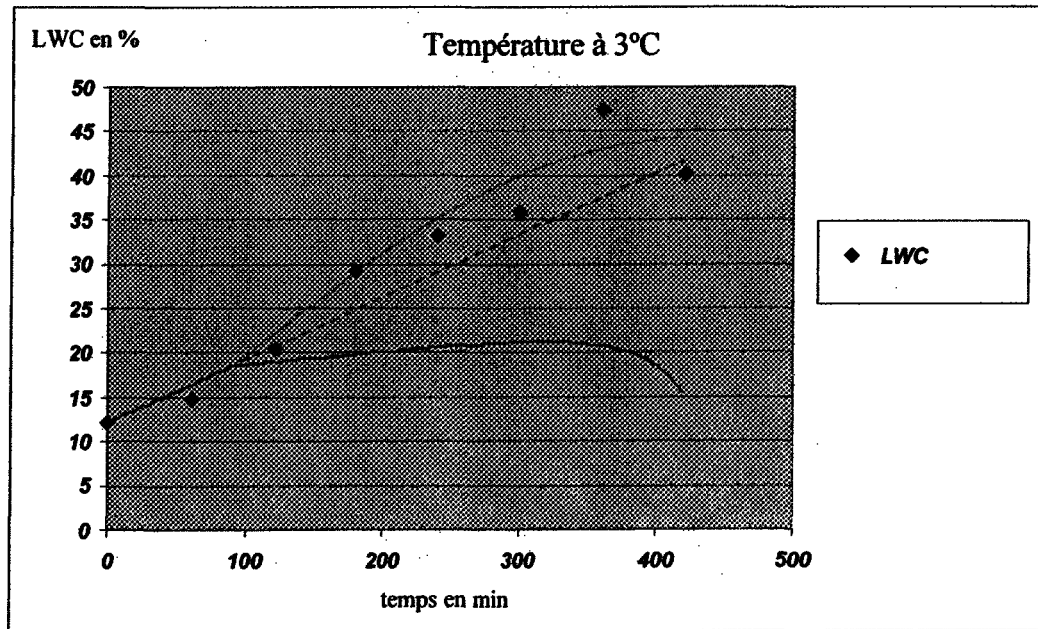


Figure A2.2: T= 3°C

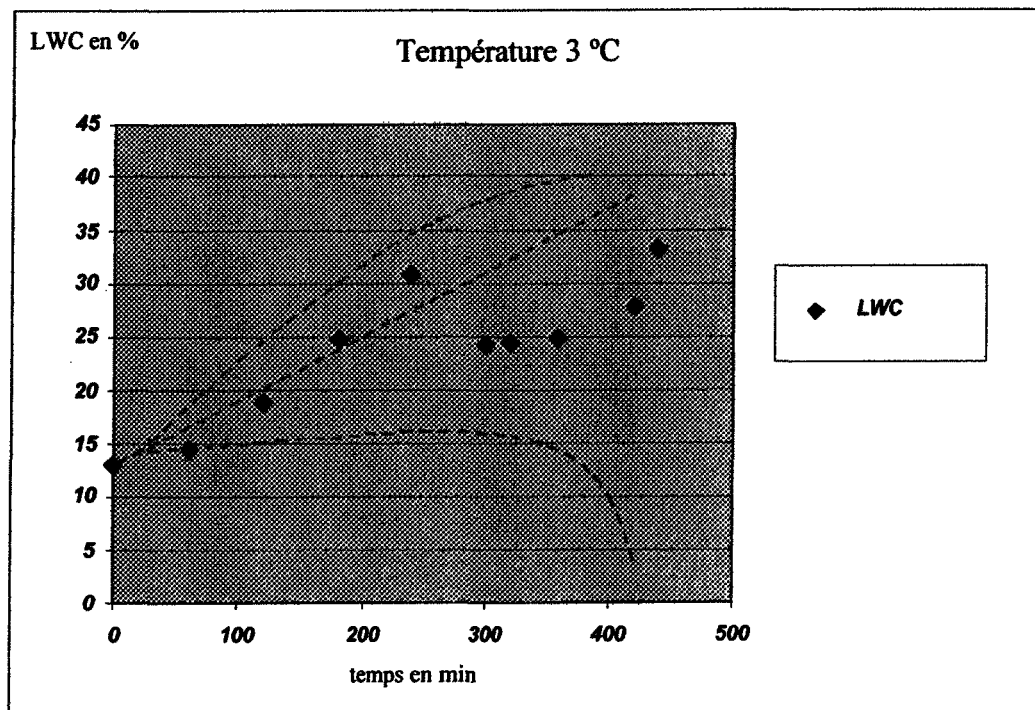


Figure A2.3: T= 3°C

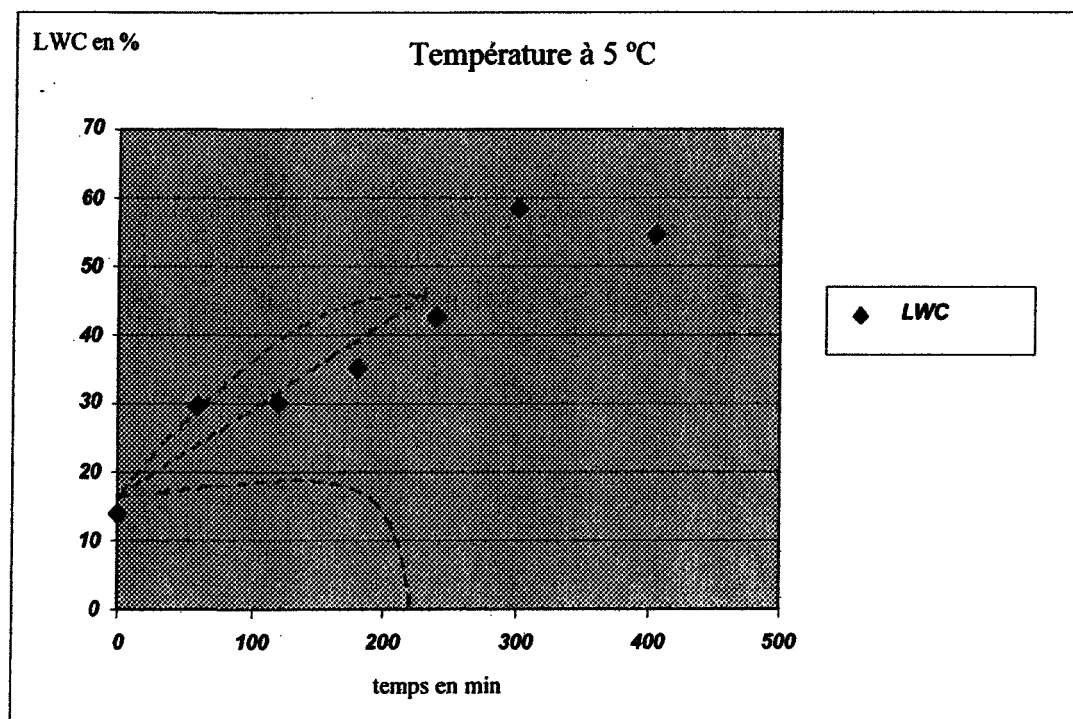


Figure A2.4: T= 5°C

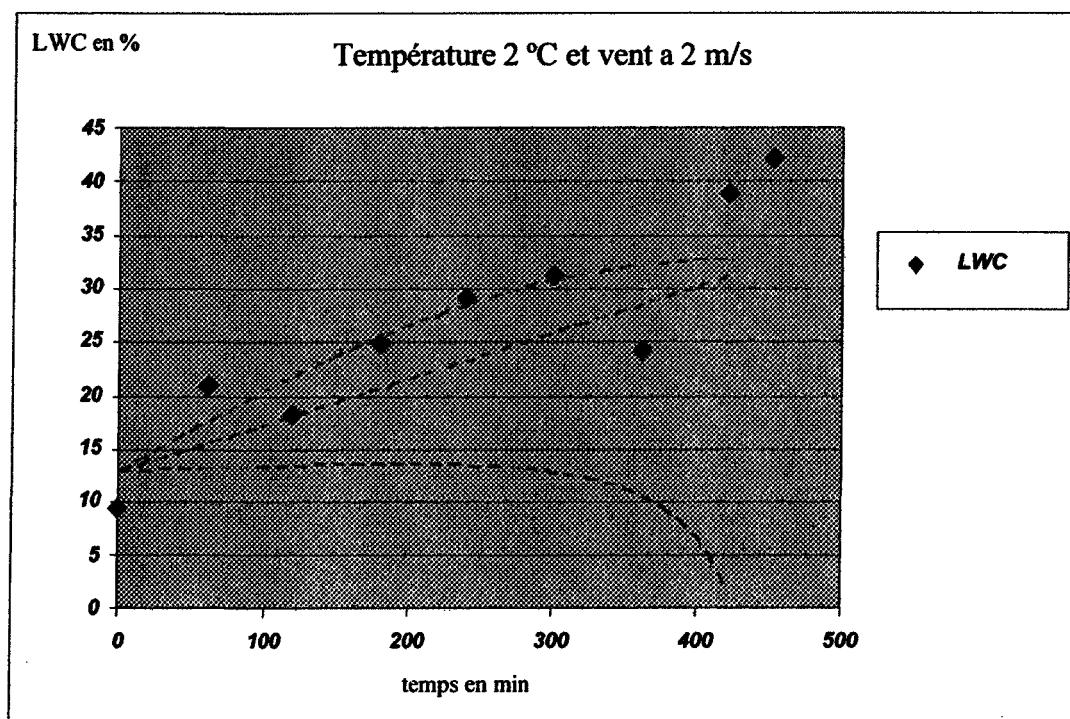


Figure A2.5 : T= 2°C et V = 2 m/s

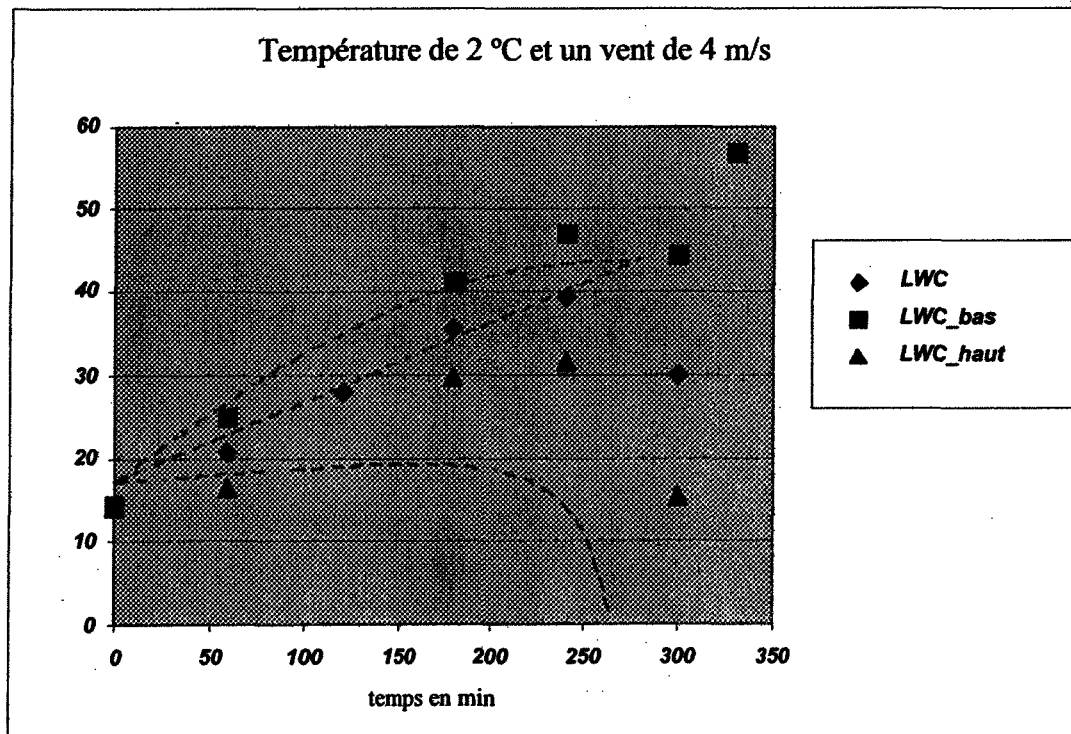


Figure A2.6 : T= 2°C et V = 4 m/s

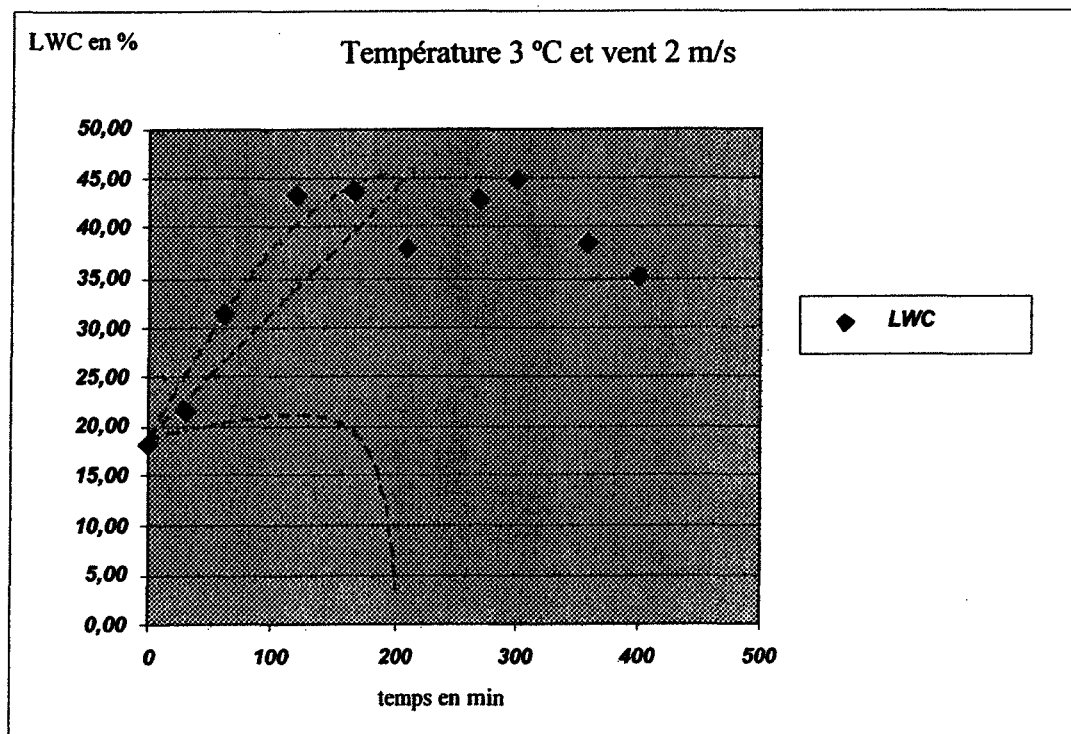


Figure A2.7 : T= 3°C et V = 2 m/s

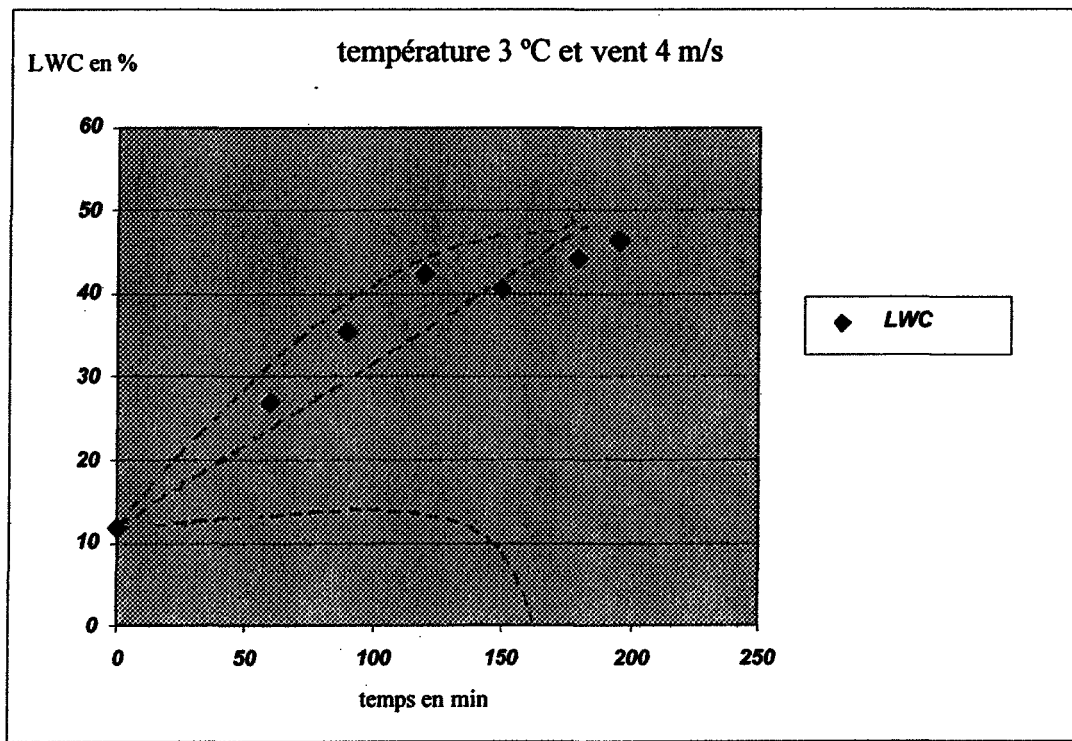


Figure A2.8 : T= 3°C et V = 4 m/s

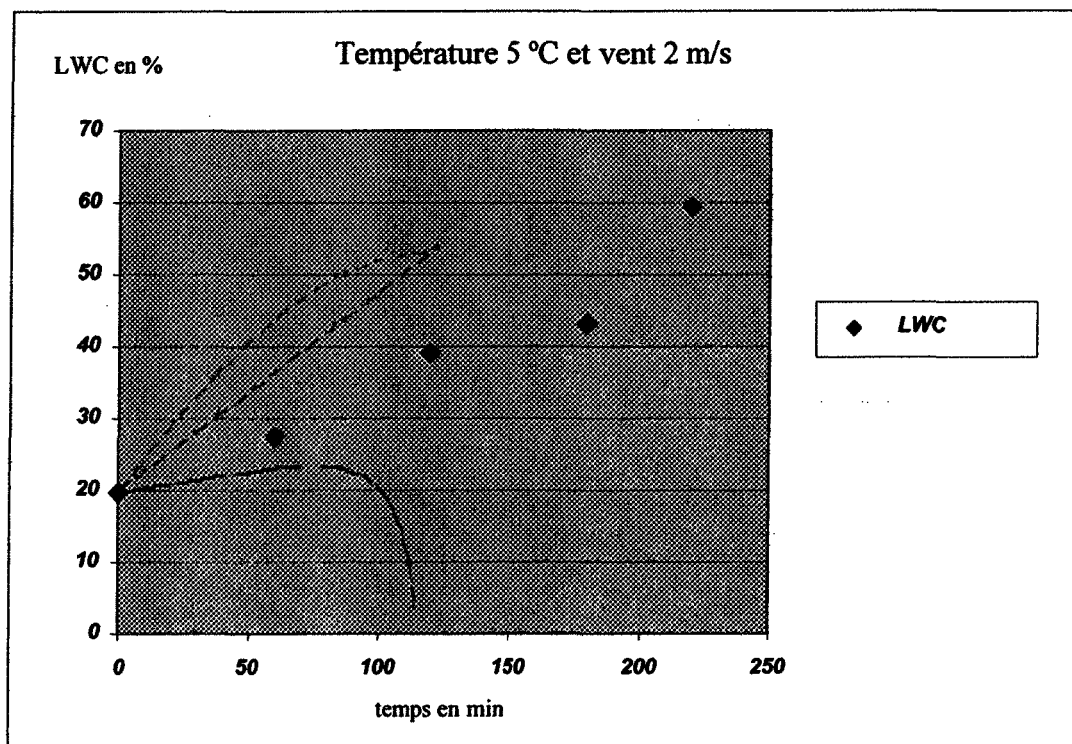


Figure A2.9 : T= 5°C et V = 2 m/s

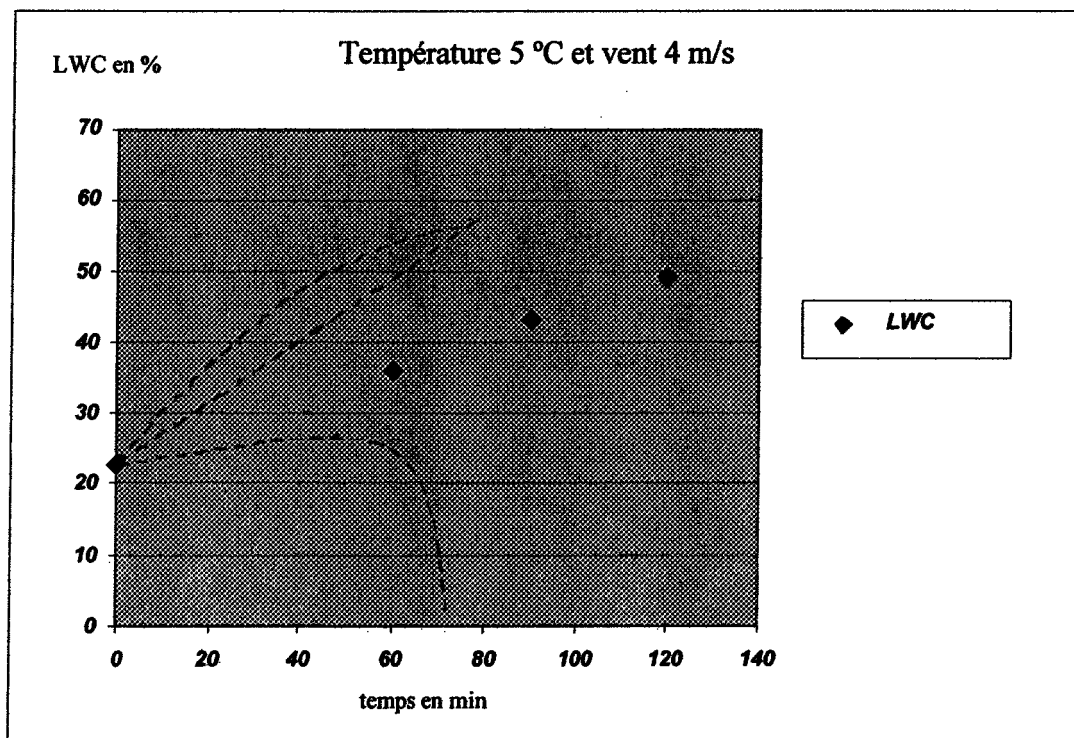


Figure A2.10 : T= 5°C et V = 4 m/s

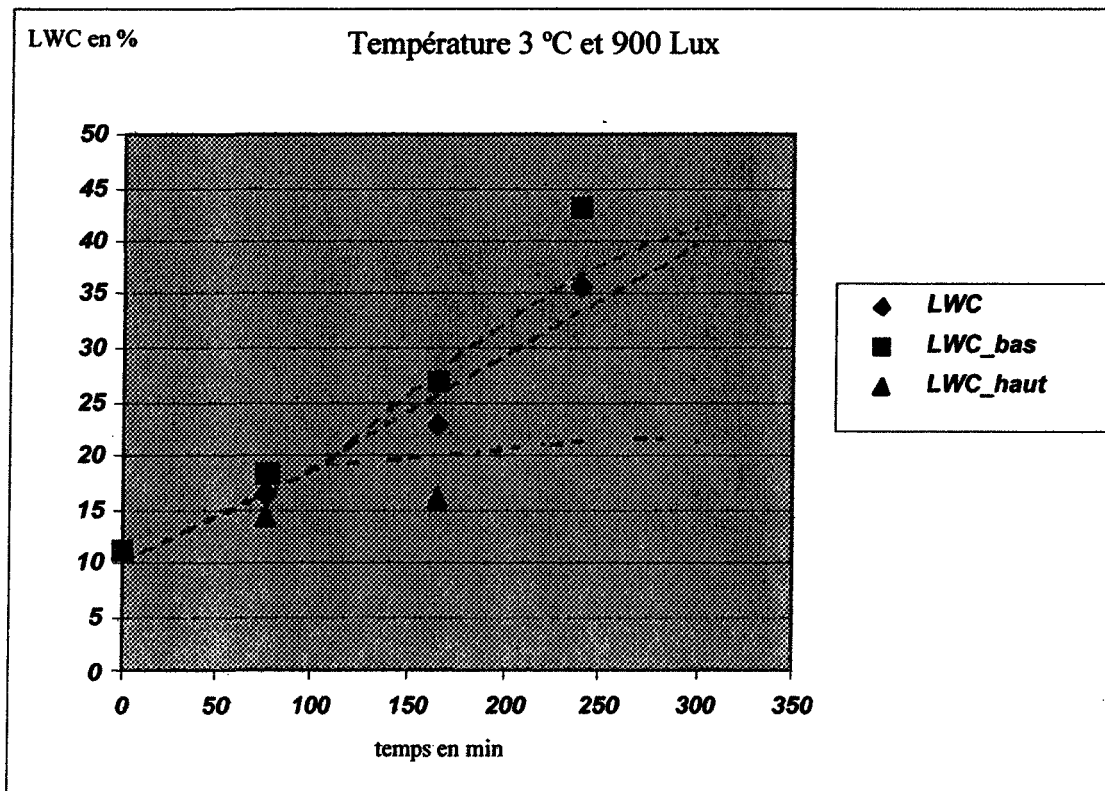


Figure A2.11 : T= 3°C et R = 900 lx

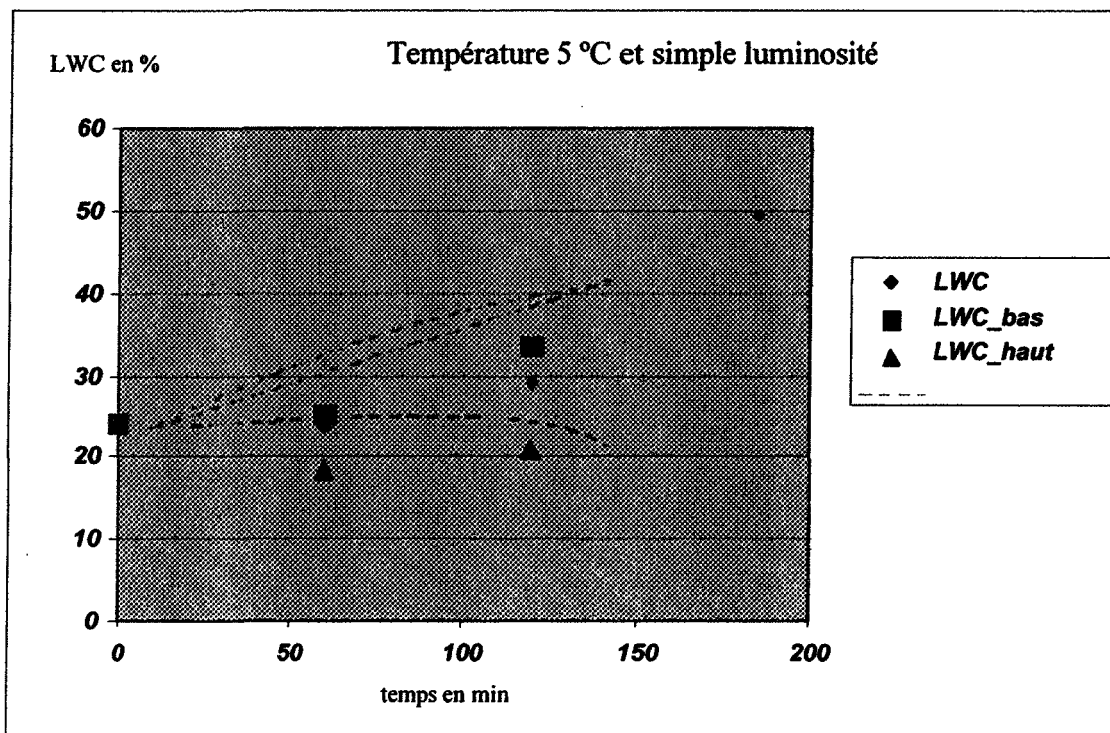
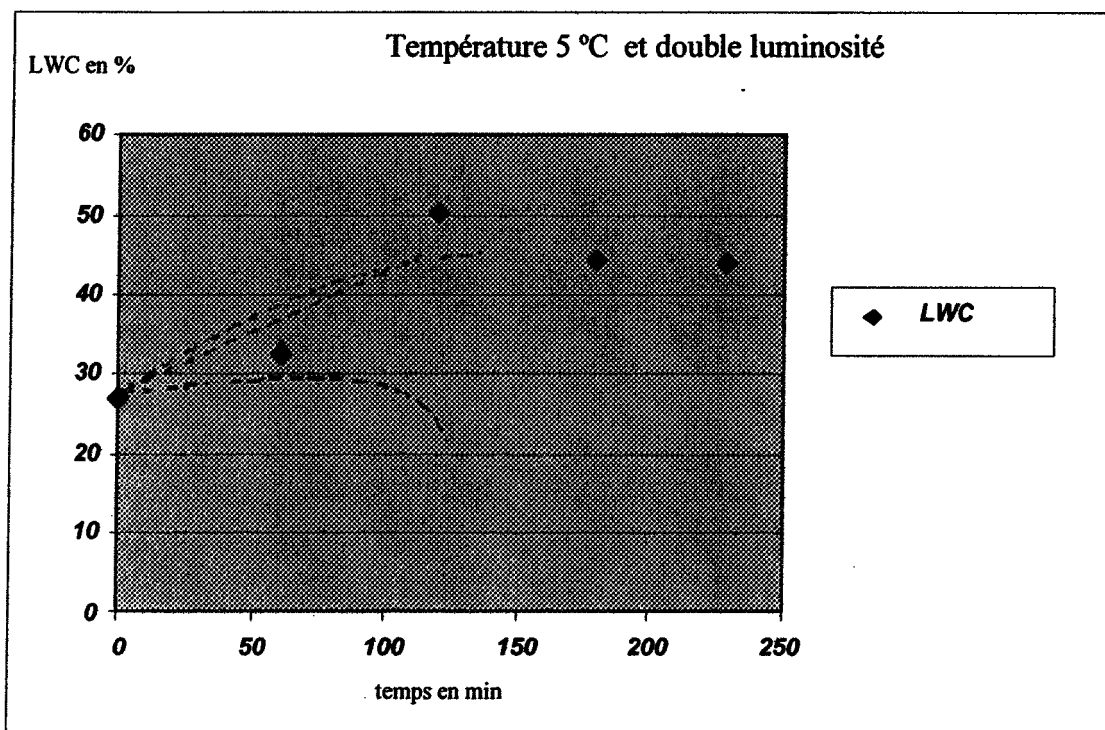
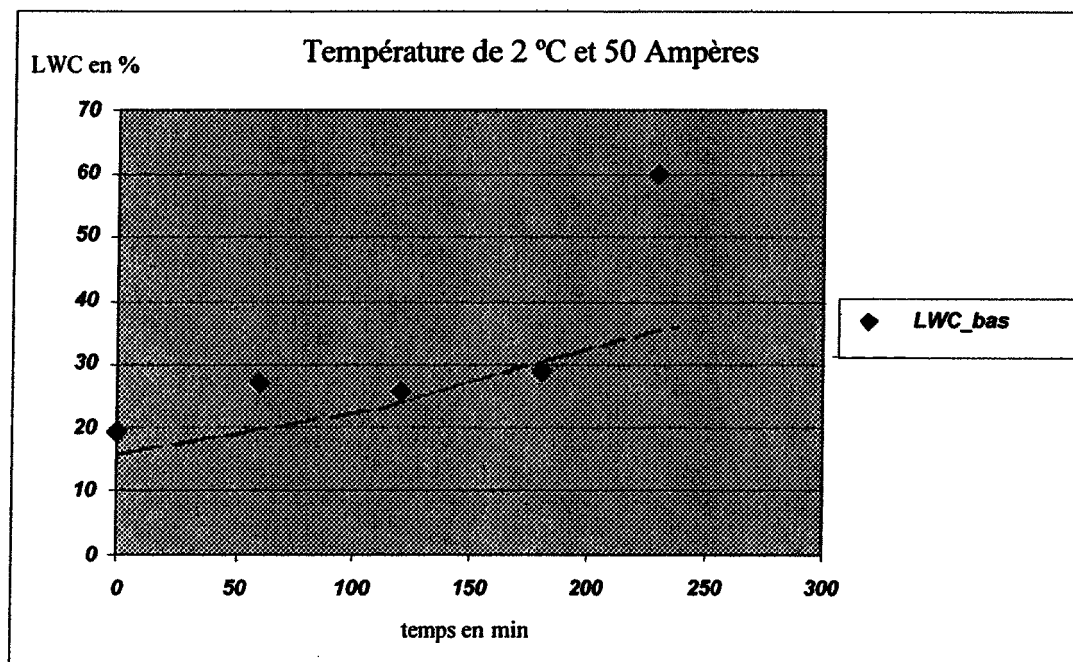


Figure A2.12 : T= 5°C et R = 450 lx



**Figure A2.13 : T= 5°C et R = 900 lx**



**Figure A2.14 : T= 2°C et I = 50 A**

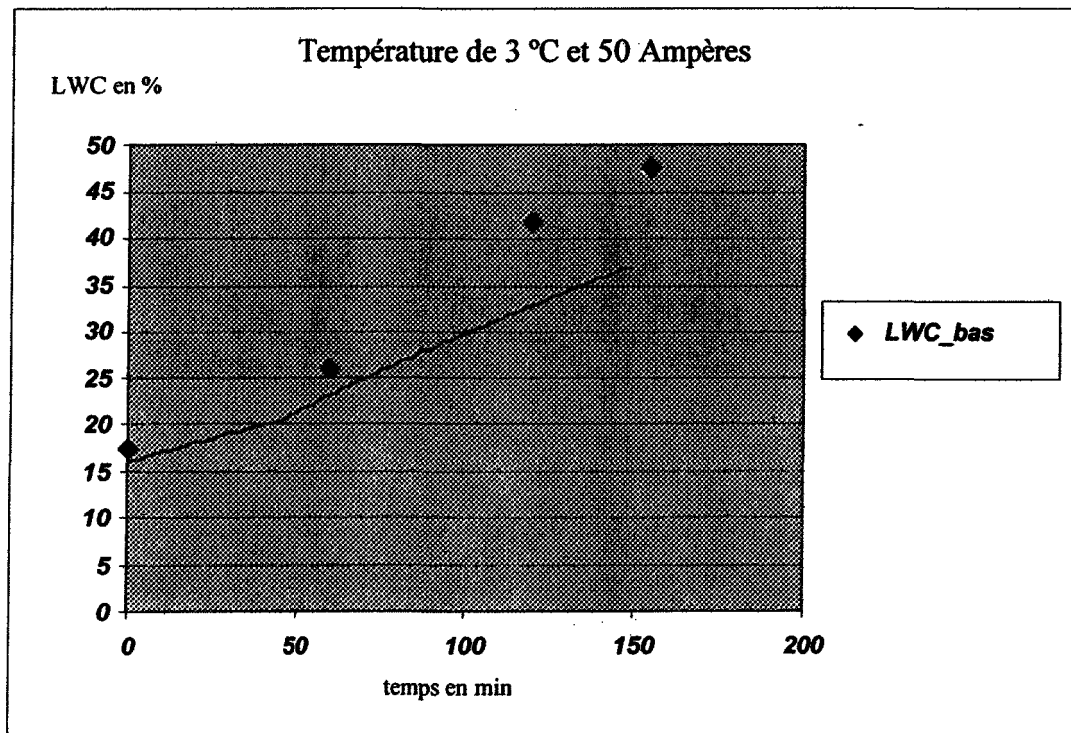


Figure A2.15 :  $T = 3^{\circ}\text{C}$  et  $I = 50\text{ A}$

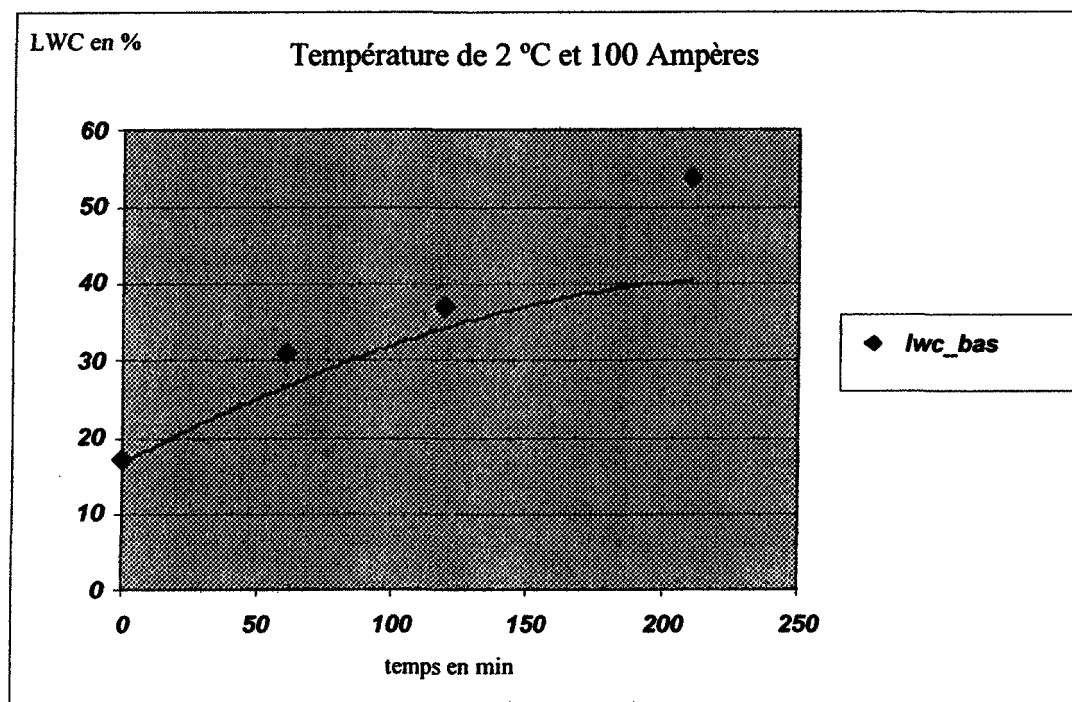


Figure A2.16 :  $T = 2^{\circ}\text{C}$  et  $I = 100\text{ A}$

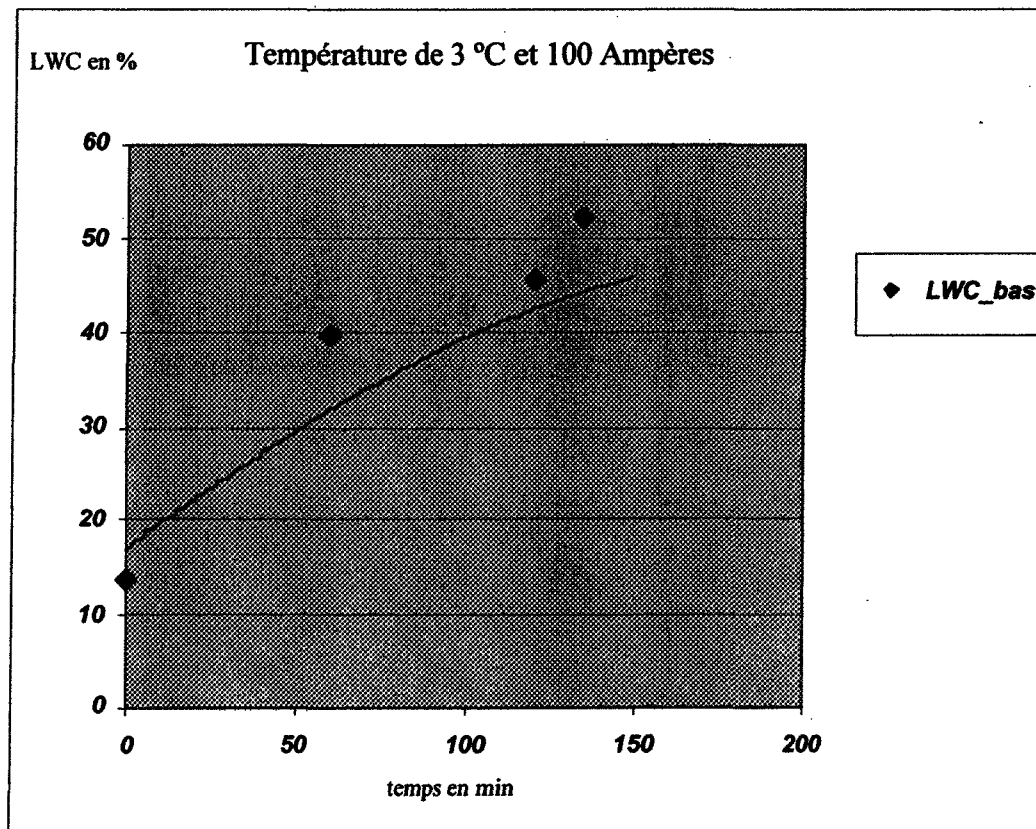


Figure A2.17 : T= 3°C et I = 100 A

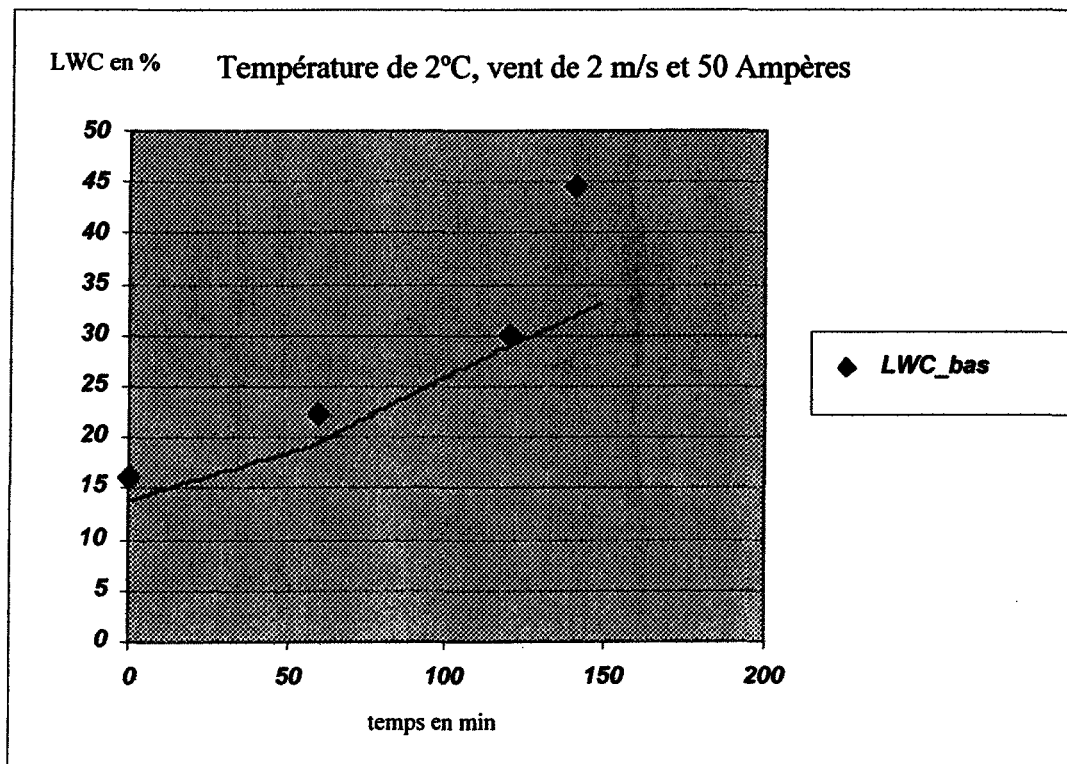


Figure A2.18: T= 2°C, V = 2 m/s et I = 50 A

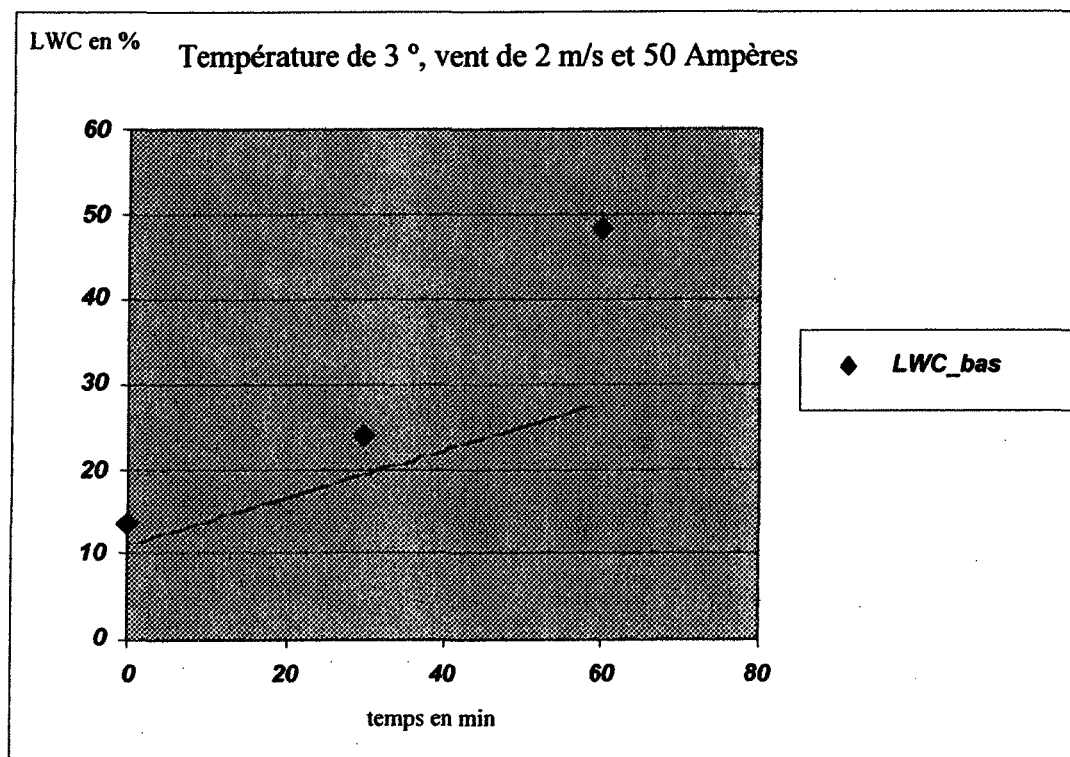


Figure A2.19: T= 3°C, V = 2 m/s et I = 50 A

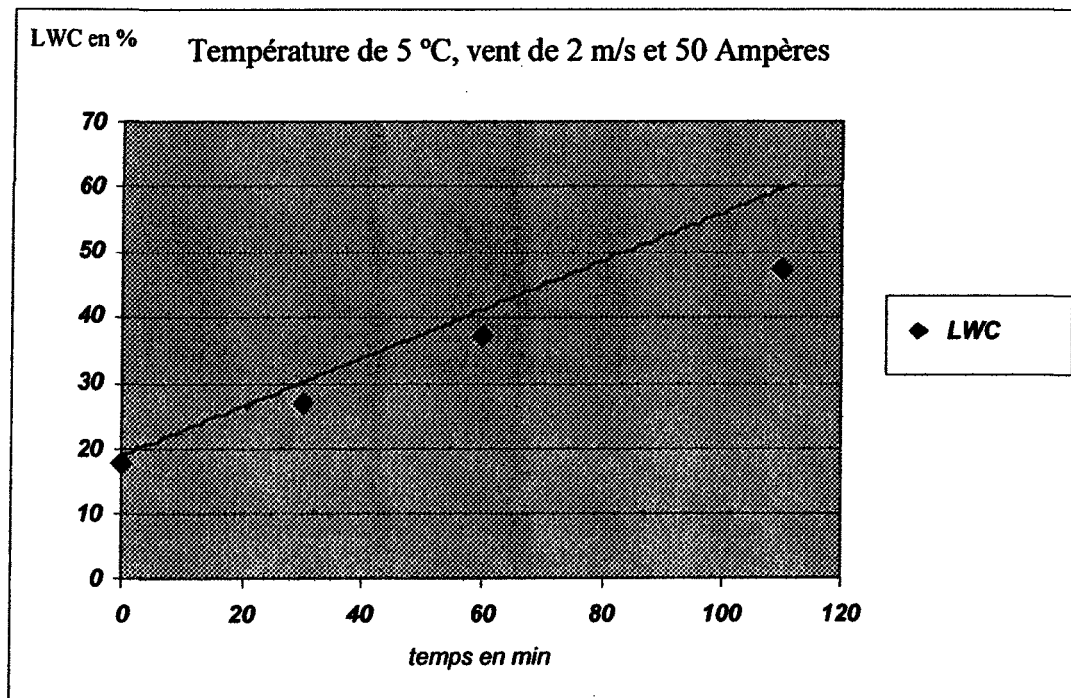


Figure A2.20: T= 5°C, V = 2 m/s et I = 50 A

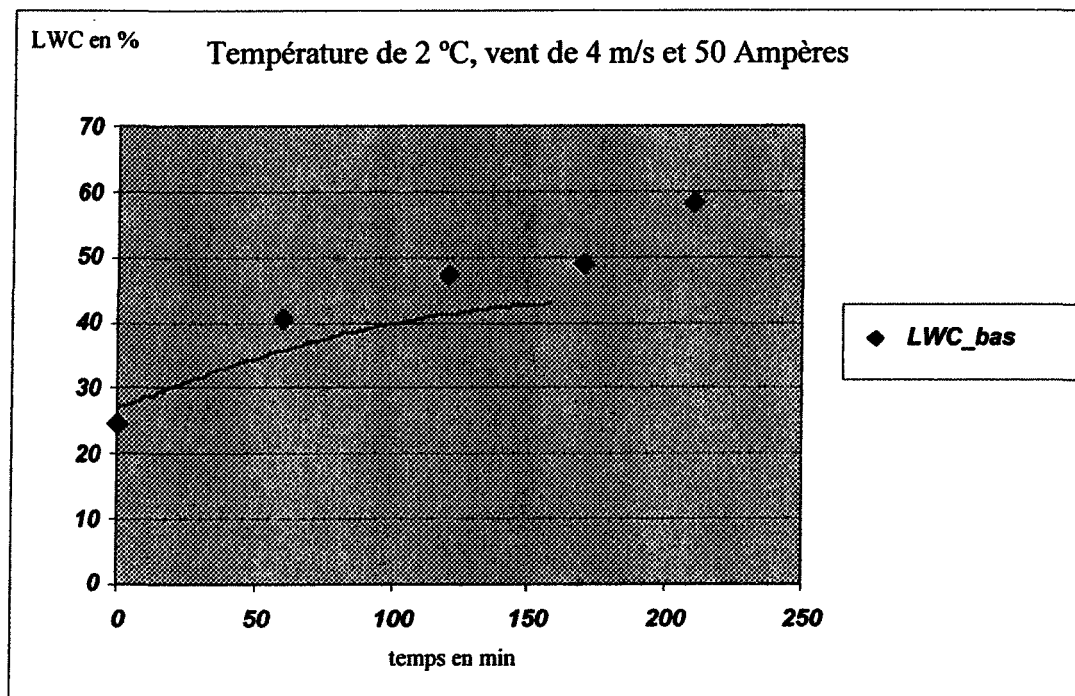


Figure A2.21: T= 2°C, V = 4 m/s et I = 50 A

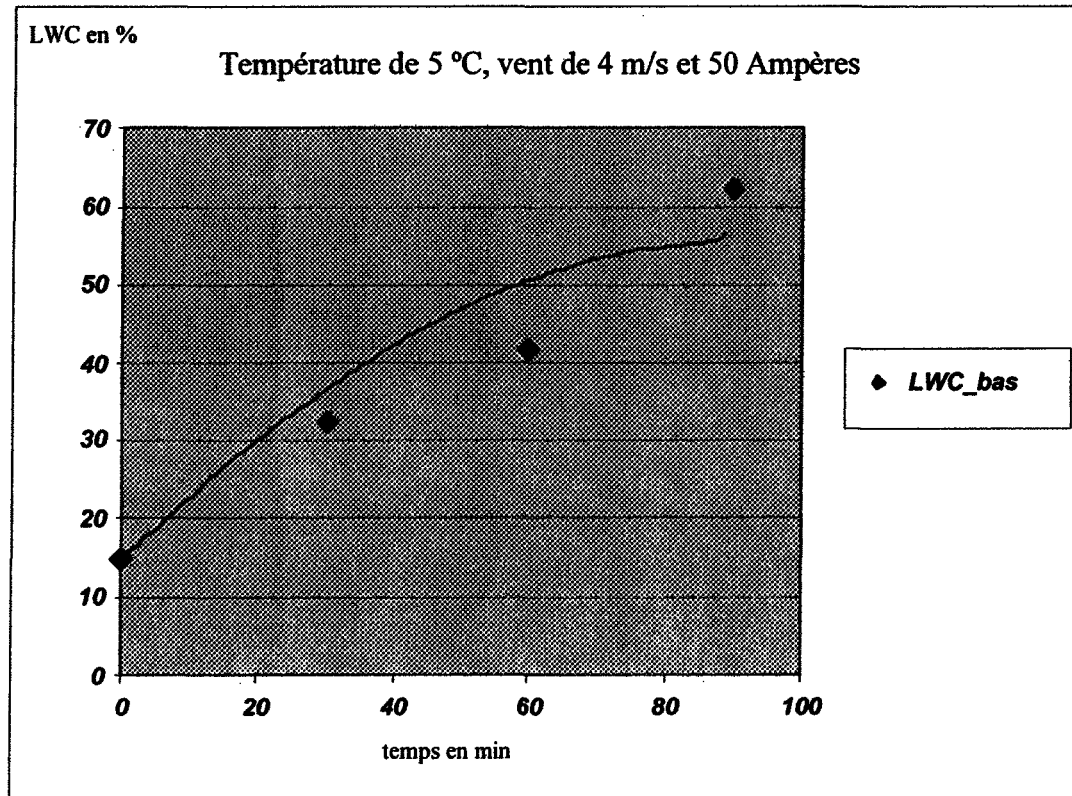


Figure A2.22:  $T = 5^{\circ}\text{C}$ ,  $V = 4 \text{ m/s}$  et  $I = 50 \text{ A}$

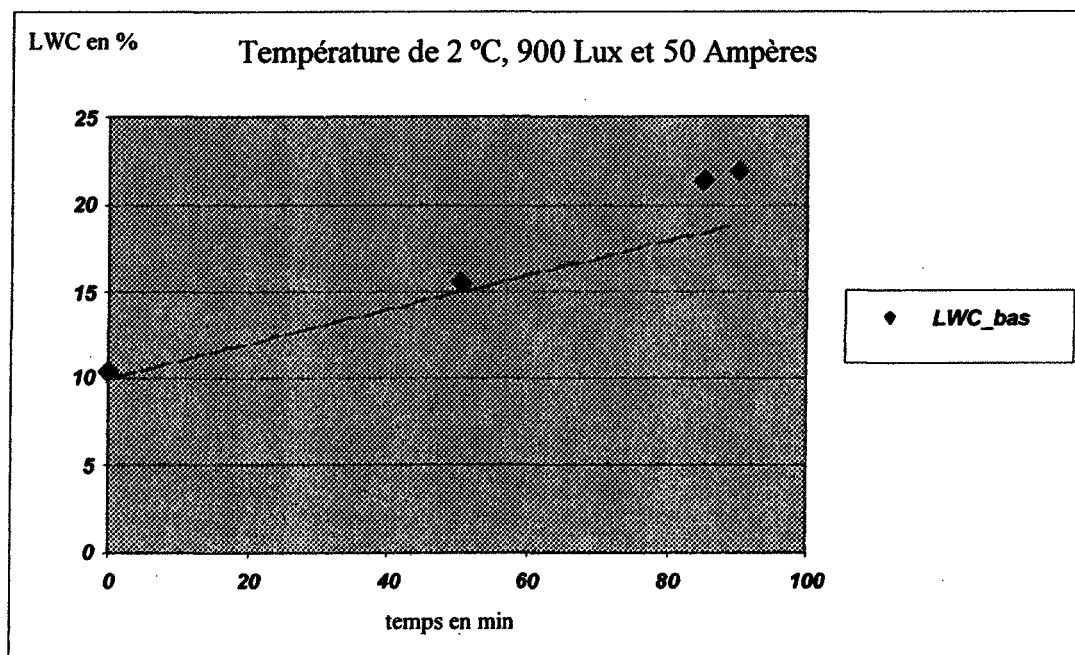


Figure A2.23 :  $T = 2^{\circ}\text{C}$ ,  $R = 900 \text{ lx}$  et  $I = 50 \text{ A}$

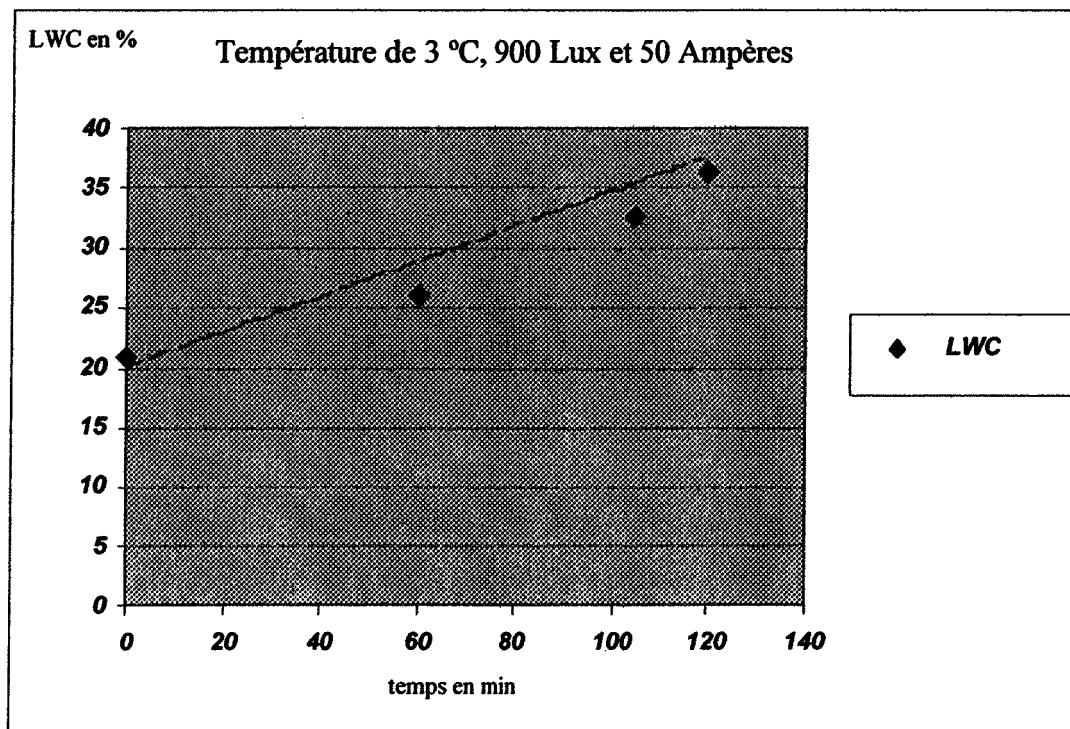


Figure A2.24 :  $T=3^{\circ}\text{C}$ ,  $R=900\text{ lx}$  et  $I=50\text{ A}$

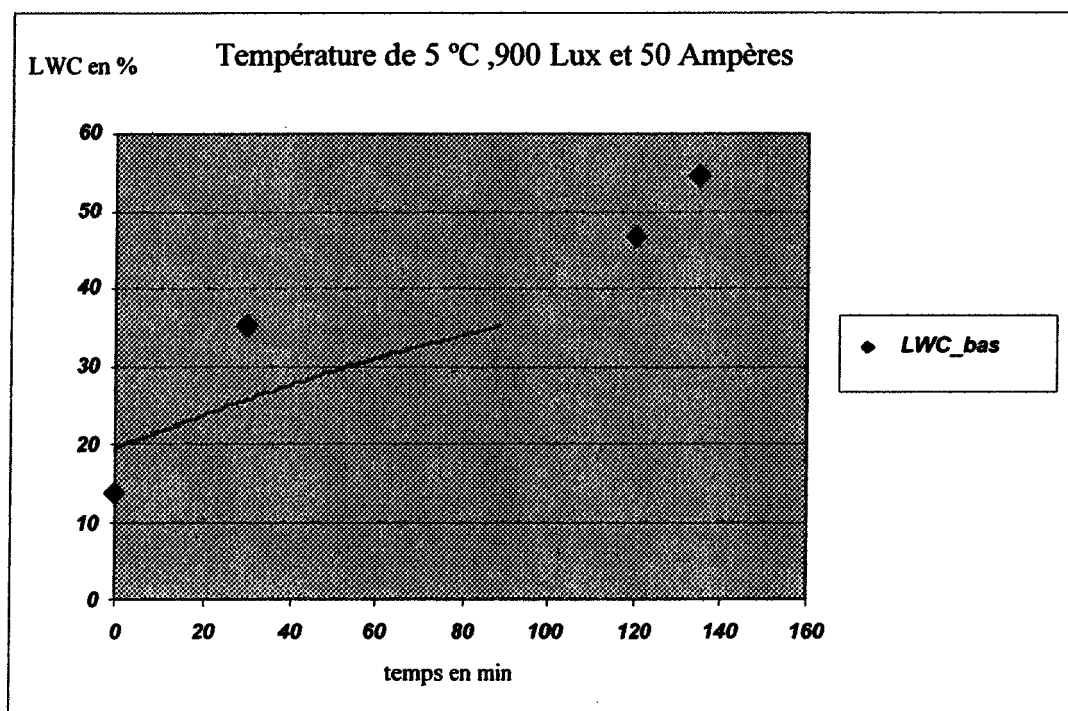


Figure A2.25 :  $T=5^{\circ}\text{C}$ ,  $R=900\text{ lx}$  et  $I=50\text{ A}$

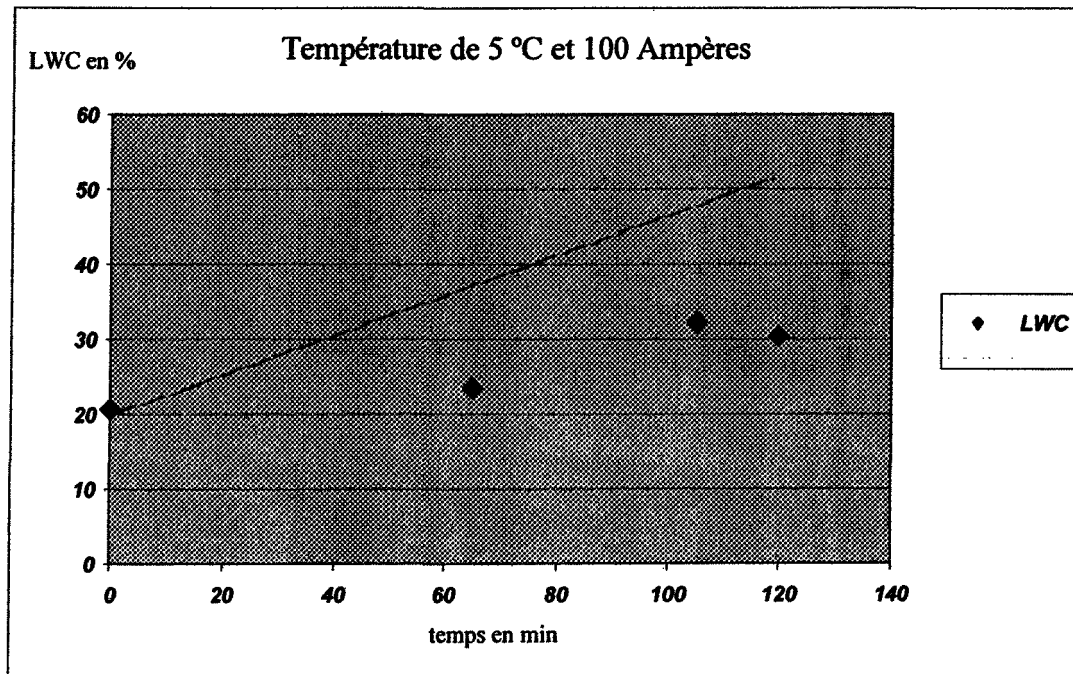


Figure A2.26 : T= 5°C et I = 100 A

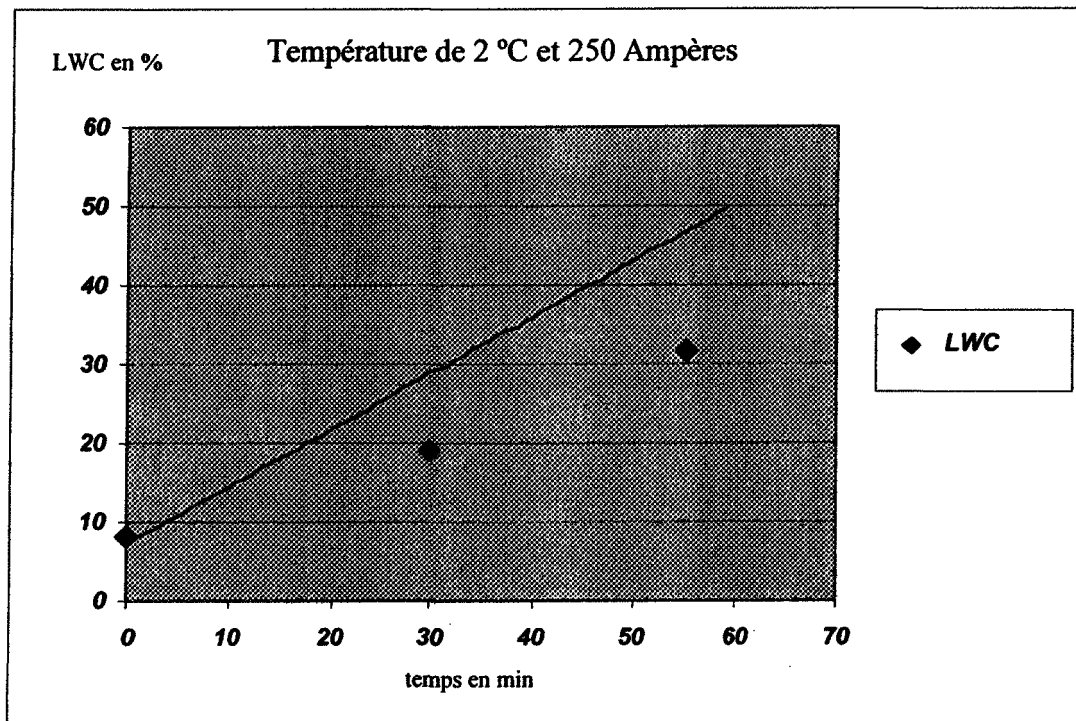


Figure A2.27 : T= 2°C et I = 250 A

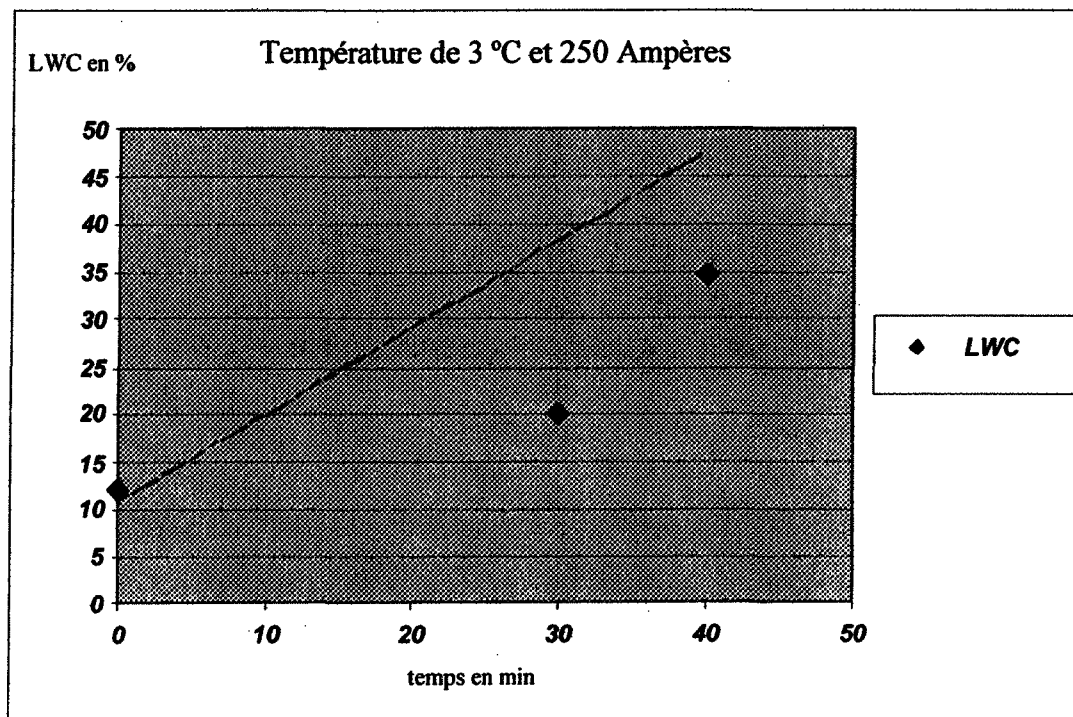


Figure A2.28 : T= 3°C et I = 250 A

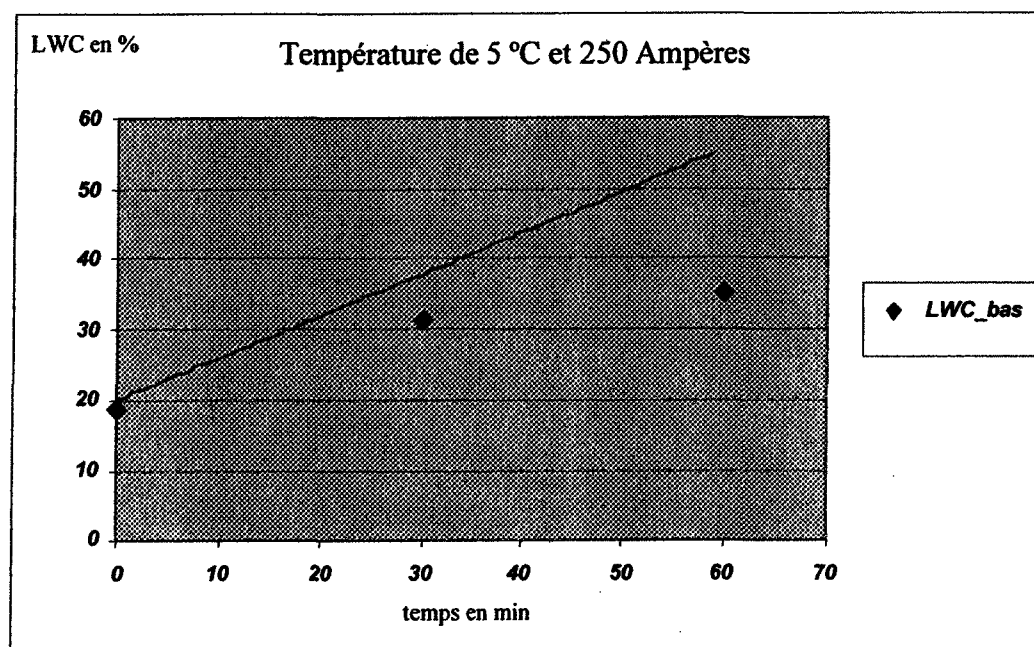


Figure A2.29 : T= 5°C et I = 250 A

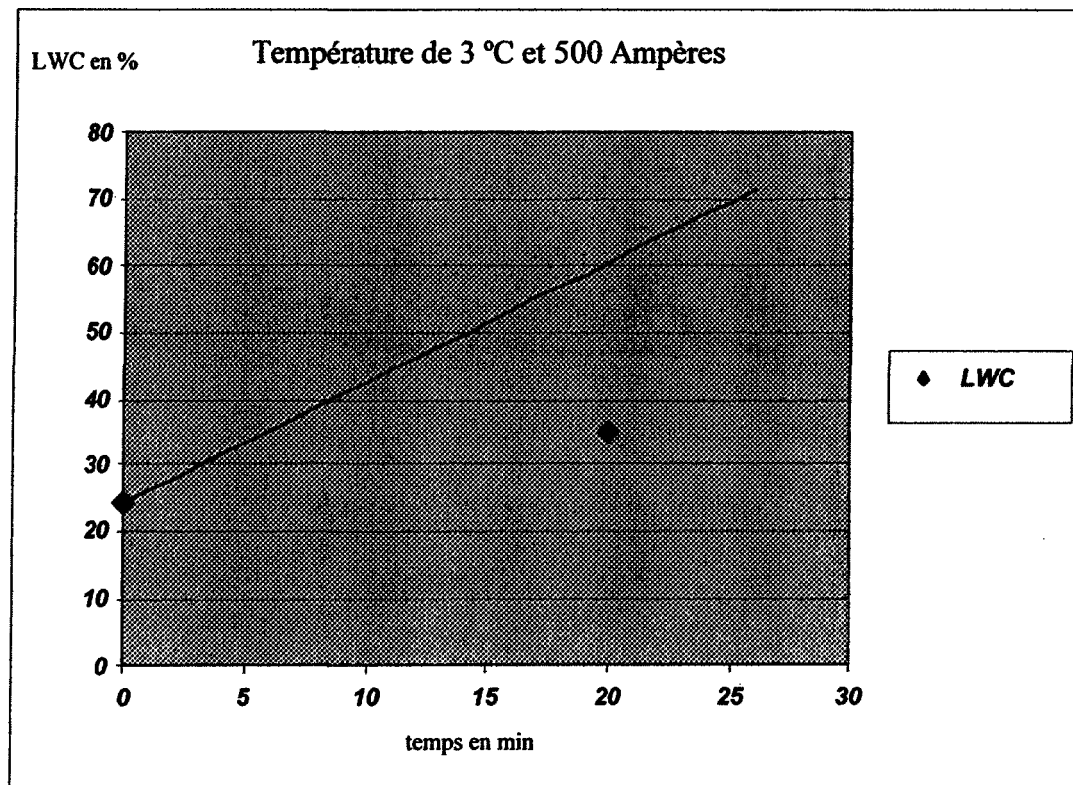


Figure A2.30 : T= 3°C et I = 500 A

## Annexe 3

# QUANTITÉ DE CHALEUR PRODUITE PAR RAYONNEMENT ET ÉVAPORATION/SUBLIMATION

### A.3.1 : Chaleur par rayonnement

Radiation heat flux conversion		
MJ/(m <sup>2</sup> .h)	$I_{lum}$ W/m <sup>2</sup>	lx (lm/m <sup>2</sup> )
0,01	2,78	265,61
0,03	8,33	796,83
0,05	13,89	1328,06
0,068	18,89	1806,16
0,1	27,78	2656,11
0,134	37,22	3559,19
0,5	138,89	13280,56
1	277,78	26561,11
1,5	416,67	39841,67
3,3	916,67	87651,67

1)

Exp. à 450 lux

2)

Exp. à 900 lux

3)

4)

**Tableau A3.1 : Conversion de l'intensité lumineuse en puissance  
(Kondratyev, 1969)**

- 1) Minimum - après le lever du soleil (9h) et avant le coucher du soleil (16h) dans un ciel très nuageux journée d'hiver
- 2) Midi dans un ciel très nuageux journée d'hiver

3) Midi dans une journée d'hiver ensoleillée

4) Midi dans une journée d'été ensoleillée

radiation onde longue (neige - mur de la chambre), $Q_{\text{long}} = \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_w^4 - T_s^4) \cdot A$						
$\epsilon$	Ta (K)	Ts (K)	D (m)	L (m)	A (m <sup>2</sup> )	Qr_long (W)
0,98	275	273	0,1	1	0,3	2.7
0,98	276	273	0,1	1	0,3	4.2
0,98	278	273	0,1	1	0,3	7

Tableau A3.2: Chaleur fournie par radiation à onde longue

Avec:

$$\sigma = 5.6704 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$$

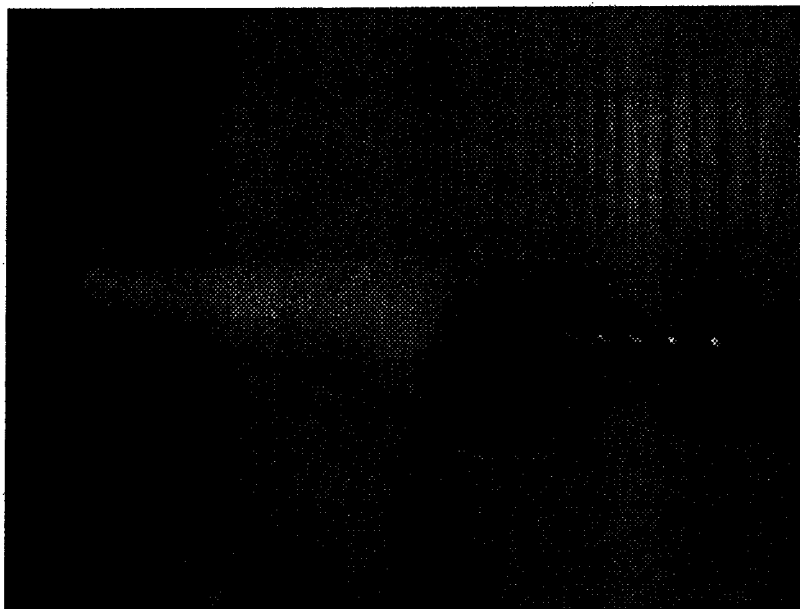
A.3. : Chaleur par évaporation et/ou sublimation

Q <sub>evap/subl</sub> (W)		TEMPERATURE en °C			
		1	2	3	5
VITESSE DU VENT en m/s	0	5,04	2,75	0,27	-5,17
	0,6	4,30	2,34	0,23	-4,39
	2	11,69	6,36	0,63	-11,93
	4	20,77	11,31	1,12	-21,20
	10	44,44	24,20	2,40	-45,36

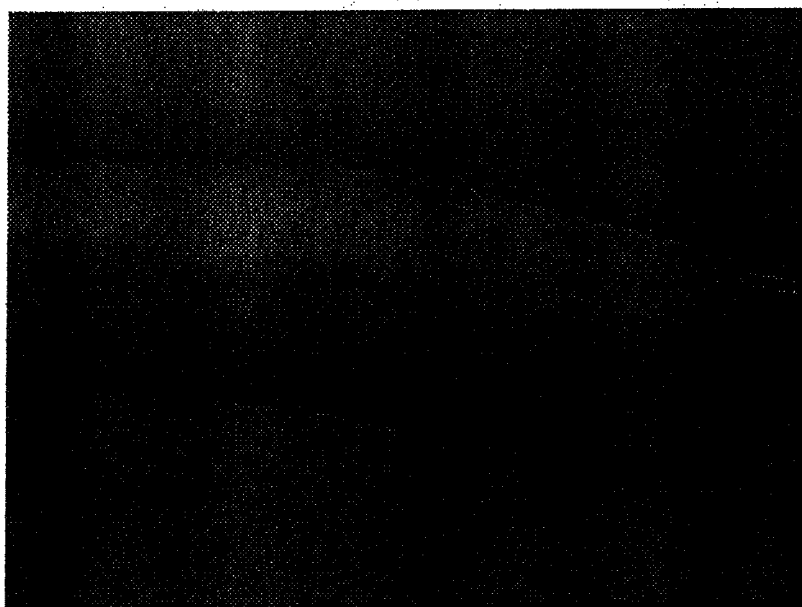
Tableau A3.3: Chaleur fournie par évaporation et/ou sublimation

## Annexe 4 :

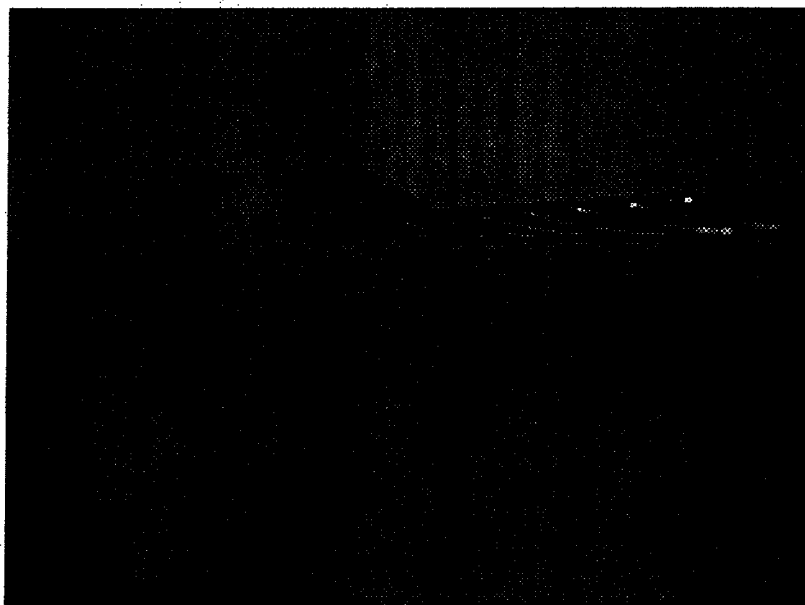
**Figure A4.1 : mardi 13 mars 2007 : température 5 degrés et vent 2 m/s**



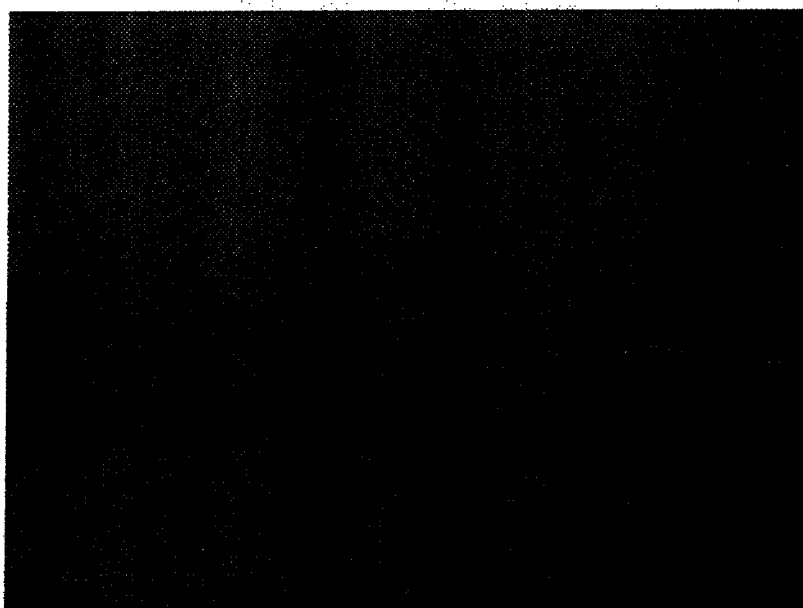
**a) 1 heure**



**b) 2 heures**

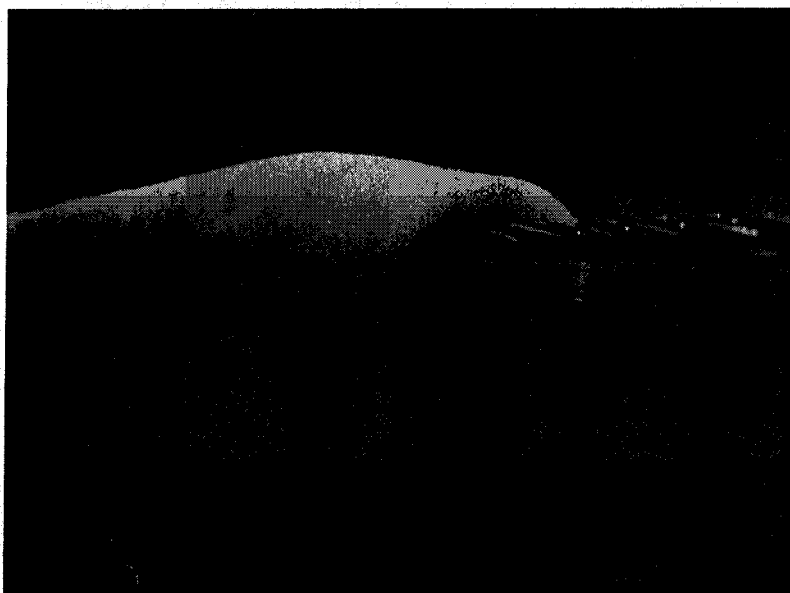


**c) 3 heures**

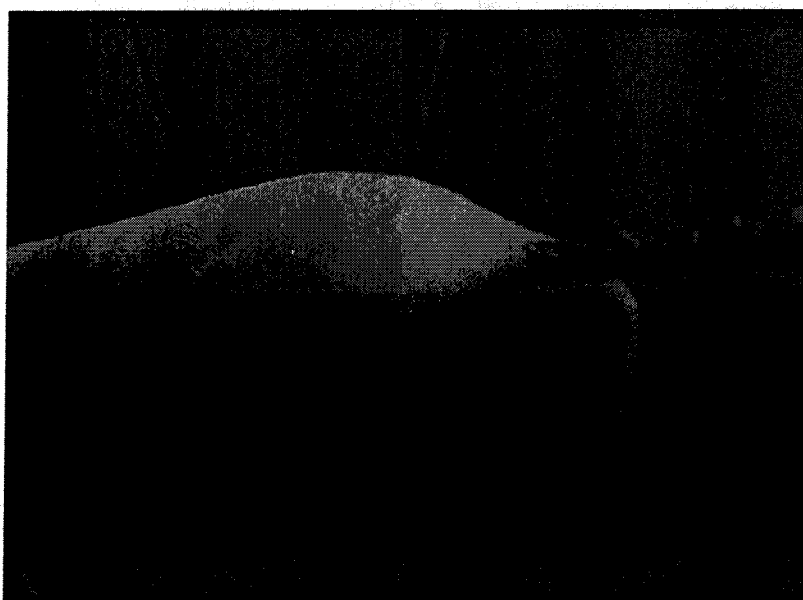


**d) après le délestage (3 heures 40)**

**Figure A4.2 : mercredi 14 mars 2007 : température 5 degrés et double intensité lumineuse**

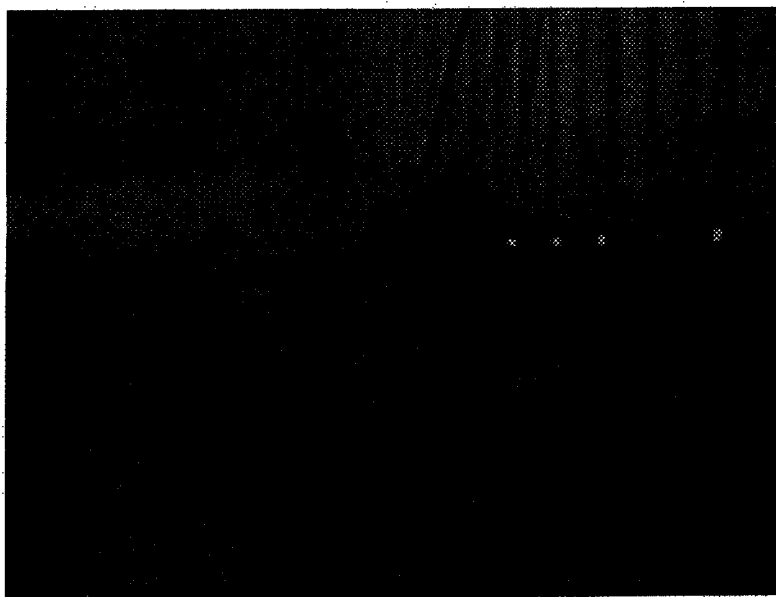


**a) 2 heures**

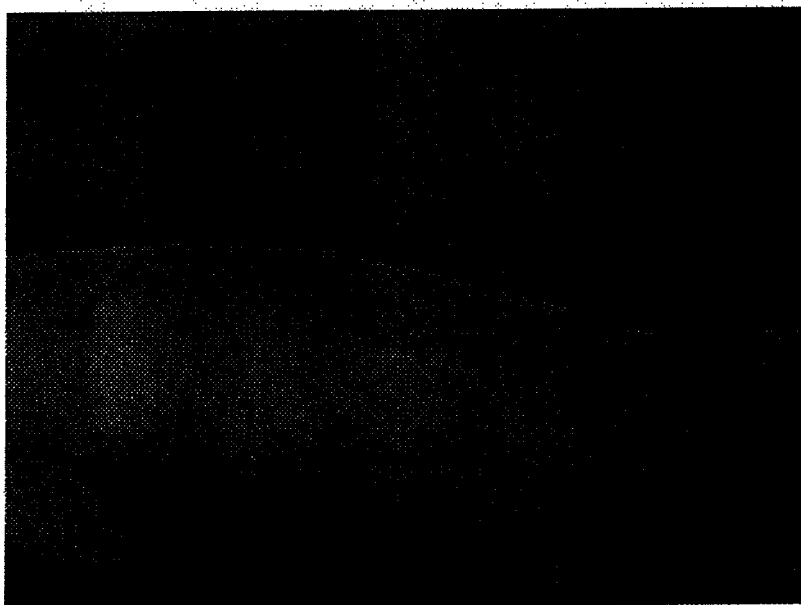


**b) 3 heures**

**Figure A4.3 : jeudi 15 mars 2007: température 2 degrés**



**a) 8 heures**



**b) 12 heures**

## Annexe 5

### Algorithme du modèle théorique réalisé sur le logiciel Matlab

```
clear;  
clc;
```

```
%%% conditions de l expérience
```

```
Ta = input ('Température ambiante en degres, Ta = ');  
U = input ('Vitesse du vent en m/s, U = ');  
Lux = input ('Intensité lumineuse en lux, Lux = ');  
I = input ('Courant électrique en Ampères, I = ');  
rho_initiale= input ('Densité initiale de la neige en g/cm^3, rho_initiale = ');  
LWCinitiale = input ('teneur en eau liquide initiale en %, LWCinitiale = ');  
N = input ('Heures totales de l expérience, N = ');
```

```
Ts=0;          %%% température de la manche  
L=1;           %%% longueur du volume de contrôle  
delta_t=1;     %%% intervalle de temps en minutes
```

```
%%% proprietes et constantes physiques
```

```
%%% chaleur latente de fusion J/kg  
Lf=333430;
```

```
%%% chaleur latente d'évaporation J/kg  
Lvap=2501300;  
%%% chaleur latente de sublimation  
Ls=2835000;
```

```
%%% accélération gravitationnelle  
g=9.81;
```

```
%%% viscosité cinématique de l air m2/s  
mua=1.34*10^(-5) ;
```

```
%%% viscosité dynamique de l air  
mudyn=1.725*10^(-5);
```

%%% chaleur spécifique de l air (pression constante) J/kg/K  
 $C_p = 1006$  ;  
 %%% pression atmosphérique  
 $P = 101$  ;  
  
 %%% conductivité thermique de l air  $W.m^{-1}.K^{-1}$   
 $k_a = 2.42 \cdot 10^{-2}$  ;  
  
 %%% conductivité thermique de Al  $W.m^{-1}.K^{-1}$   
 $k_c = 237$  ;  
  
 %%% diamètre de la douille de la neige en m  
 $DIA = 9.5 \cdot 10^{-2}$  ;  
  
 %%% diamètre du câble en m  
 $D_c = 1.275 \cdot 10^{-2}$  ;  
  
 %%% résistance en ohms du câble  
 $resistance = 0.0016875$  ;  
  
 %%% Nombre de Prandtl  
 $Pr = \mu_{dyn} \cdot C_p / k_a$  ;  
  
 %%% nombre de Schmidt  
 $Sc = \mu_a / 2.1e-5$  ;  
  
 %%% emissivite  
 $\epsilon = 0.98$  ;  
  
 %%% constante de Stefan-Boltzmann  
 $\sigma = 5.6703 \cdot 10^{-8}$  ;  
  
 %%% humidité relative  
 $H_r = 0.8$  ;  
  
 %%% nombre de Lewis  
 $lewis = 0.875$  ;  
  
 %%% Albedo de la neige  
 $albedo = 0.6$  ;  
  
 %%% volume de la douille en mètre cube  
 $volume\_initiale = L \cdot (DIA^2 - D_c^2) \cdot 3.1416 / 4$  ;

```

%%%% calcul de l aire initiale
aire_initial=(DIA^2-Dc^2)*3.1416/4;

%%%% masse de neige accumulée sur le câble
M=rho_initiale*volume_initiale*1000;

%%%% rayon initiale
r=DIA/2;

%%%% calcul du coefficient de convection

%%%% densité de l air  kg/m3
rhoa=1.293*(273/(Ta+273));

if U>0;

    %%%Nombre de Reynolds
    Re=(rhoa*U*DIA)/mua;

    %%%Nombre de Nusselt
    Nu=0.032*Re^0.83;
    h=ka*Nu/DIA;

else
    beta=1/((Ta+273)+(Ts+273))/2);
    Re=(rhoa*U*DIA)/mua;
    Gr=(g*(rhoa^2)*beta*(Ta-Ts)*(DIA^3))/(mudyn^2);
    Nu=0.525*(Gr*Pr)^(1/4);
    h=ka*Nu/DIA;

end

if Ta==5;

    deltaw=0.611-Hr*0.873;
end

if Ta==3;

    deltaw=0.611-Hr*0.758;
end

if Ta==2;

```

```

    deltaw=0.611-Hr*0.706;
end

if Ta==1;

    deltaw=0.611-Hr*0.658;
end

Xw=(0.622*h*Lvap*Hr)/(Cp*P*(lewis^(2/3)));
Xi=(0.622*h*Lv*Hr)/(Cp*P*(lewis^(2/3)));

deltai=0.611173;

%%% aire de la douille cote
A_cote=((DIA^2-Dc^2)*3.1416/4);

%%% aire de la douille latérale
A_laterale= 3.1416*DIA*L;

LWC(1)=LWCinitiale;

t= zeros(1,(N+1)*60+1);    %%%% temps en minutes

for i=2:1:(N+1)*60+1
    t(i)=t(i-1)+1;
end

%%% Premier pas afin de déterminer le changements de géométries

%%% masse qui fond en convection
Mfa=(h*(A_laterale)*(Ta-Ts)/Lf)*t*60;

%%% masse qui fond par radiation
Mrad=(1-albedo)*(Lux*t*60/(0.035*683))/Lf*DIA*L;
Mlum=epsilon*sigma*(DIA*L)*(((Ta+273)^4)-(273^4))*t*60/Lf;

%%% masse qui fond par effet de Joule
Mj=resistance*I*I*t*60/Lf;

%%% masse qui s évapore/sublime
Me=0.622*(Lvap/Cp)*((Pr/Sc)^0.63)*h*(A_laterale)*(deltaw/P)*t*60/Lf;

```

```

%%% masse qui fond au total
Mf=Mfa+Mrad+Mj-Me+Mlum;

delta_Mf(i)=Mf(i)-Mf(i-1);

%%% teneur en eau liquide en fonction du temps
LWC=(Mf/M*100)+LWCinitiale;

delta_LWC=LWC((N+1)*30)-LWC(((N+1)*30)-1);

%%% Calcul du flux volumique

alpha= 54700; %%% =rho_w*g/mu_w a 0 degres en (cm.s)^(-1)
a=0.625*10^(-9); %%% coefficient en cm^2
b=8;
phi=zeros(1,(N+1)*60);
Swi=zeros(1,(N+1)*60);
Sw=zeros(1,(N+1)*60);
S=zeros(1,(N+1)*60);
aire_plan=zeros(1,(N+1)*60);
Uw=zeros(1,(N+1)*60);
y=zeros(1,(N+1)*60);
vecteur=0;
airel=zeros(1,(N+1)*60);
airel(1)=0.5*aire_initial;
rho_int=zeros(1,(N+1)*60);
vol_int=zeros(1,(N+1)*60);
vol=zeros(1,(N+1)*60);
vol_t(1)=volume_initiale;
densite(1)=rho_initiale*1000;

for i=1:1:(N+1)*60
    %%% changement de la porosité en fonction du temps
    phi(i)=1-(((densite(i)-(1000*LWC(i))*(densite(i)/1000)/100))/917);

    %%% saturation irreductible
    Swi(i)=14/100;

    %%% saturation
    Sw(i)=LWC(i)*(densite(i)/1000)/phi(i)/100;

    if Sw(i) < Swi(i);
        S(i)=0;
    end
end

```

```

else
    S(i)=(Sw(i)-Swi(i))/(1-Swi(i));
end

%%% perméabilise
kw= a*(S.^2).*exp(phi.*b);

%%% flux volumique de l'eau en cm/s
Uw=kw.*alpha;

%%% calcul du débit en m2/s
DEBIT(i)=Uw(i)*3.1416*Dc/2/100;

delta_y(i)=(DEBIT(i)*delta_t*60/Dc);

y(i+1)=y(i)+delta_y(i);

if y(i)>r;
    y(i)=-0.01;
    aire1(i)=0;
end

if y(i)>=0
    vecteur=vecteur+1;
end

delta_rho_neige(i)=delta_LWC/100*densite(i)/2;
rho_int(i)=delta_rho_neige(i)+densite(i);
vol_int(i)=vol_t(i)*densite(i)/rho_int(i);
vol_t(i+1)=vol_int(i)-(delta_y(i)*Dc);
R_int(i)=((((vol_int(i)+(y(i)*Dc))*4/3.1416)+(Dc^2))^(1/2))/2;

y1(i)=R_int(i)-y(i);
if y(i)<R_int(i)-Dc/2
    aire1(i)=-y(i)*(R_int(i)^2-y(i)^2)^(1/2)+(0.5*3.1416*R_int(i)^2-...
        (R_int(i)^2*(atan(y(i)/(R_int(i)^2-y(i)^2)^(1/2))))-Dc^2*3.1416/8;
else
    aire1(i)=-y(i)*(R_int(i)^2-y(i)^2)^(1/2)+(0.5*3.1416*R_int(i)^2-
        (R_int(i)^2*(atan(y(i)/(R_int(i)^2-...
            y(i)^2)^(1/2))))-(Dc^2*3.1416/8-(-y1(i)*((Dc/2)^2-
            y1(i)^2)^(1/2)+(0.5*3.1416*(Dc/2)^2)-...
            ((Dc/2)^2*(atan(y1(i)/((Dc/2)^2-y1(i)^2)^(1/2))))));
end
aire2(i)=vol_t(i)/L-aire1(i);
densite(i+1)=M/vol_t(i+1);

```

end

%%% calcul de l'eau produite selon le changement de surface

```
t_final=zeros(1,vecteur);
M1=zeros(1,vecteur);
M2=zeros(1,vecteur);
M1_eau=zeros(1,vecteur);
M1_neige=zeros(1,vecteur);
M2_eau=zeros(1,vecteur);
M2_neige=zeros(1,vecteur);
V1=zeros(1,vecteur);
V2=zeros(1,vecteur);
V1_eau=zeros(1,vecteur);
V2_eau=zeros(1,vecteur);
V1_neige=zeros(1,vecteur);
V2_neige=zeros(1,vecteur);

LWC_final=zeros(1,vecteur);
LWC_HAUT=zeros(1,vecteur);
LWC_BAS=zeros(1,vecteur);
LWC_final(1)=LWCinitiale;
LWC_BAS(1)=LWCinitiale;
LWC_HAUT(1)=LWCinitiale;

volume_final=zeros(1,vecteur);
transfert=zeros(1,vecteur);
delta_transfert=zeros(1,vecteur);
delta_LWC_final=zeros(1,vecteur);
aire_plan(1)=(DIA-Dc)*L;

M1(1)=M/2;
M2(1)=M-M1(1);
M1_eau(1)=LWC(1)*M1(1)/100;
M1_neige(1)=M1(1)-M1_eau(1);
M2_eau(1)=LWC(1)*M2(1)/100;
M2_neige(1)=M2(1)-M2_eau(1);
V1(1)=aire1(1)*L;
V2(1)=aire2(1)*L;
V1_eau(1)=M1_eau(1)/1000;
V2_eau(1)=M2_eau(1)/1000;
V1_neige(1)=V1(1)-V1_eau(1);
V2_neige(1)=V2(1)-V2_eau(1);
```

```

LWC_BAS(1)=LWCinitiale;
LWC_HAUT(1)=LWCinitiale;
densite_final(1)=rho_initiale*1000;
rho_haut(1)=rho_initiale*1000;
rho_bas(1)=rho_initiale*1000;

for i=2:1:vecteur
    t_final(i)=t_final(i-1)+1;
end
Me_final(1)=0;

for i=2:1:vecteur

    Mfa_final=(h*(A_laterale)*t_final*60*(Ta-Ts))/Lf;

    Mrad_final=(1-albedo)*(Lux*t_final*60/(0.035*683))/Lf*DIA*L;

    Mlum_final=epsilon*sigma*(DIA*L)*(((Ta+273)^4)-(273^4))*t_final*60/Lf;

    Mj_final(i)=resistance*I*I*t_final(i)*60/Lf;

Me_final(i)=0.622*(Lvap/Cp)*((Pr/Sc)^0.63)*h*(A_laterale)*(deltaw/P)*t_final(i)*60/Lf;

    Mf_final(i)=Mfa_final(i)+Mrad_final(i)+ Mj_final(i)-Me_final(i)+Mlum_final(i);

    delta_Mf_final(i)=Mf_final(i)-Mf_final(i-1);

    LWC_final(i)=(Mf_final(i)/M*100)+LWCinitiale;

    if S(i)>0
        delta_transfert(i)=0.5*(delta_Mf_final(i));
    else
        delta_transfert(i)=0;
    end

    ratio(i)=aire1(i)/(aire1(i)+aire2(i));

    Mneige(i)=(1-LWC_final(i)/100)*M;
    Mneigel(i)=ratio(i)*Mneige(i);

```

```

Mneige2(i)=Mneige(i)-Mneige1(i);

volume_final(i)=vol_t(i);
delta_vol(i)=volume_final(i-1)-volume_final(i);
densite_final(i)=M/volume_final(i);


M1(i)=M1(i-1)-2*((R_int(i)^2-y(i)^2)^(1/2)-Dc/2)*delta_y(i)/aire1(i)*M1(i-1)-
delta_transfert(i);

M2(i)=M-M1(i);

M1_eau(i)=M1_eau(i-1)-2*((R_int(i)^2-y(i)^2)^(1/2)-Dc/2)*delta_y(i)/aire1(i)*
M1_eau(i-1)+ratio(i)*delta_Mf_final(i)-delta_transfert(i);

M2_eau(i)=M2_eau(i-1)+2*((R_int(i)^2-y(i)^2)^(1/2)-Dc/2)*delta_y(i)/aire1(i)*
M1_eau(i-1)+((1-ratio(i))*delta_Mf_final(i))+delta_transfert(i);

LWC_HAUT(i)=(M1_eau(i)/M1(i))*100;
LWC_BAS(i)=(M2_eau(i)/M2(i))*100;

rho_haut(i)=M1(i)/aire1(i);
rho_bas(i)=M2(i)/aire2(i);

if M1_eau(i)<0
    M1_eau(i)=0;
    LWC_HAUT(i)=0;
    LWC_HAUT(i)=0;
    rho_haut(i)=0;
    rho_bas(i)=0;
end

end

```

```
figure(1)  
plot(t_final,LWC_final,t_final,LWC_HAUT,t_final,LWC_BAS);
```

```
title('Variation de la teneur en eau liquide');  
xlabel('temps en min');  
ylabel('LWC en %');
```

```
figure(2)  
plot(t_final,densite_final,'b',t_final,rho_haut,'g',t_final,rho_bas,'r')
```

**Nom du document :** OLQMA\_FINA\_correct.doc  
**Répertoire :** E:\impression dimanche  
**Modèle :** C:\Documents and Settings\etudiantdsea\Application  
Data\Microsoft\Modèles\Normal.dot  
**Titre :** UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI  
**Sujet :**  
**Auteur :** oolqma  
**Mots clés :**  
**Commentaires :**  
**Date de création :** 01/10/2009 17:20:00  
**N° de révision :** 6  
**Dernier enregist. le :** 02/10/2009 15:07:00  
**Dernier enregistrement par :** oolqma  
**Temps total d'édition :** 43 Minutes  
**Dernière impression sur :** 04/10/2009 21:27:00  
**Tel qu'à la dernière impression**  
    **Nombre de pages :** 156  
    **Nombre de mots :** 22 066 (approx.)  
    **Nombre de caractères :** 121 369 (approx.)