

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

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

**PAR
ZHIHAI HE**

**ÉVALUATION DES TEMPS DE PROTECTION DE
PRODUITS ANTIGIVRANTS DANS DIFFÉRENTES
CONDITIONS CLIMATIQUES**

AOÛT 1995



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

Résumé

La formation de la glace sur les avions au sol est nuisible au décollage; c'est pourquoi on la prévient par l'application de fluides dégivrants et antigivre. L'Association Européenne des Lignes Aériennes a établi une procédure normalisée pour le contrôle de la qualité de ces produits qui sont évalués à partir de la mesure des temps de protection. Les temps de protection des produits antigivre commerciaux utilisés en aéronautique sont actuellement mesurés à partir d'une évaluation effectuée en chambre climatique utilisant une plaque inclinée recouverte du produit testé et exposée à différents contextes micro-climatiques au-dessous de 0 °C. Ce travail se veut être une contribution à la recherche dans le domaine des produits antigivre par l'étude systématique des effets des différents paramètres susceptibles d'affecter les temps de protection de ces produits.

Le travail expérimental consiste à mesurer les temps de protection de film du fluide antigivre soumis à des conditions atmosphériques en bas de 0 °C en utilisant des plaques planes inclinées à différents angles de façon à simuler une aile d'avion. De façon à compléter l'étude expérimentale, une étude analytique est consacrée à l'élaboration de deux modèles simples qui permettent de prédire le temps de protection du fluide à partir du niveau de dilution.

Ce travail a permis de montrer que l'intensité des précipitations et la température de l'air sont les deux facteurs les plus importants. Il est possible,

sur la base des mesures expérimentales, de prédire que le temps de protection est une fonction de puissance de l'intensité des précipitations et de l'inclinaison de la plaque, d'autre part il est une fonction exponentielle de la température du fluide. Ces relations empiriques permettent d'établir des recommandations, à l'usage des pilotes, quant aux temps de protection en fonction des conditions climatiques.

He Zihai,
étudiant

Laforte Jean-Louis,
directeur de recherche

Remerciements

Je tiens à remercier premièrement le Dr. Jean-Louis Laforte et le Dr. Patrick René Louchez, professeurs au sein du Groupe de Recherche en Ingénierie de l'Environnement Atmosphérique (GRIEA), département des sciences appliquées de l'université du Québec à Chicoutimi, qui sont respectivement directeur et co-directeur de ma maîtrise, pour avoir dirigé mes travaux et pour m'avoir donné de judicieux conseils lorsque nécessaire. Je les remercie particulièrement pour avoir corrigé mon mémoire et pour m'avoir permis d'améliorer mes capacités à communiquer en français. Je remercie spécialement le GRIEA pour le soutien financier.

De l'assistance technique que j'ai reçue au laboratoire de GRIEA, il m'est agréable de souligner l'importante contribution de Monsieur Du Nguyen-Dang, M.Sc.A.. Je remercie également tous les membres du GRIEA pour leur aide très appréciée.

Je tiens également à remercier Monsieur Michel Frédéric, M.Sc.A., pour son aide dans la correction du français de mon mémoire.

Enfin, j'aimerais remercier mon épouse Ling Liu, qui a dactylographié le manuscrit, pour son soutien durant toute la durée de mes travaux.

Table des matières

Résumé	ii
Remerciements	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux	ix
Liste des figures.....	x
Notation	xiv
1. Introduction	1
1.1 Problématique	1
1.2 Objectifs	5
1.3 Méthodologie.....	5
1.4 Plan de travail	6
2. Méthodes expérimentales.....	7
2.1 Introduction	7
2.2 Chambre climatique	7
2.3 Simulation de l'aile d'un avion.....	10
2.3.1 Masse thermique	10
2.3.2 Surface de l'aile d'un avion	15
2.4 Application du fluide.....	16
2.5 Génération des précipitations	20
2.5.1 Dispositif expérimental.....	20
2.5.2 Distribution uniformisée des précipitations de glace ..	22
2.5.3 Mesure du spectre des gouttelettes	24
2.6 Procédure générale d'essai.....	26
3. Résultats expérimentaux	29
3.1 Épaisseur du fluide.....	29

3.2 Effet de l'intensité de précipitations et de la température	36
3.2.1 Description des essais	36
3.2.2 Effet de l'intensité	39
3.2.3 Effet de la température	46
3.3 Effet de l'inclinaison de la plaque.....	51
3.3.1 Mode opératoire.....	51
3.3.2 Observations	52
3.4 Effet de la courbure.....	54
3.4.1 Mode opératoire.....	54
3.4.2 Résultats expérimentaux.....	55
4. Prédiction du temps de protection	57
4.1 Introduction	57
4.2 Caractéristiques du fluide FPD	58
4.3 Protection antigivre	61
4.4 Modélisation du front de glace	64
4.4.1 Description générale des deux modèles	65
4.4.2 Algorithmes de calcul de la dilution et de la densité....	67
4.5 Modèle avec précipitations.....	71
4.5.1 Loi d'épaisseur.....	71
4.5.2 Établissement de la loi d'épaisseur	73
4.5.3 Prédiction des temps de protection	74
4.5.4 Validation du modèle 1	79
4.6 Modèle sans précipitations	80
4.6.1 Loi d'épaisseur sans précipitations	81
4.6.2 Méthode de calculs	83
4.6.3 Prédiction des temps de protection	84
4.6.4 Validation du modèle	86

4.6.4.1 Effet de l'intensité de précipitations.....	87
4.6.4.2 Effet de la température	88
5. Discussion	90
5.1 Comparaison des modèles.....	90
5.2 Qualité et précision du second modèle	91
6. Conclusions	94
Bibliographie	96

Annexes

Annexe A Observations des temps de protection sur l'effet de l'intensité de givrage et de la température.....	99
Annexe B Observations des temps de protection sur l'effet de l'inclinaison à la température -5°C	105
Annexe C Observations des temps de protection sur l'effet de la courbure à la température -5°C pour une inclinaison de la plaque à 10°	107
Annexe D Le code source du programme de simulation modèle 1	109
Annexe E Les résultats calculés par le modèle 1	114
Annexe F Le code source du programme de simulation modèle 2	124
Annexe G Les résultats calculés par le modèle 2	130

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Température (°C) des plaques à différentes positions sur le support.....	15
Tableau 2.2 Caractéristiques du produit antigivre A344	16
Tableau 2.3 Viscosité Brookfield (mPa s)	17
Tableau 2.4 Épaisseurs du fluide à trois positions sur la plaque	20
Tableau 2.5 Résultats des essais de calibration	23
Tableau 2.6 Paramètres retenus pour l'essai standard d'endurance à l'eau pulvérisée	24
Tableau 3.1 Épaisseurs (μm) mesurées en fonction du temps pour différentes positions et inclinaisons des plaques	30
Tableau 3.2 Paramètres environnementaux des essais	37
Tableau 3.3 Paramètres n et R^2 de la loi de puissance	46
Tableau 3.4 Paramètres t_{ref} , ΔT_t et R^2 de la loi exponentielle	48
Tableau 3.5 Paramètres n_{ref} , ΔT_n et R^2 de la loi linéaire	49
Tableau 3.6 Paramètres environnementaux: effet de l'inclinaison	51
Tableau 3.7 Paramètres t_{ref} , n et R^2 de la loi de puissance	52
Tableau 3.8 Paramètres environnementaux: effet du rayon de courbure en tête	54
Tableau 4.1 Comparaison de valeurs expérimentales à celles calculées par le modèle 1	80
Tableau 4.2 Valeurs de paramètres de la loi d'épaisseur	82
Tableau 4.3 Comparaison des temps de protection calculés et mesurés pour différentes intensités à -5 °C.....	87
Tableau 4.4 Comparaison des temps de protection calculés à ceux observés à trois températures	89
Tableau 5.1 Comparaison entre le modèle 1 et le modèle 2	91

Liste des figures

Figure 2.1 Schéma de la chambre climatique.....	8
Figure 2.2 Enregistrement de la température ($I = 14 \text{ g/dm}^2\text{h}$).....	9
Figure 2.3 Disposition des plaques sur le support réfrigéré.....	11
Figure 2.4 Montage utilisé pour la mesure du volume minimal	18
Figure 2.5 Temps pour obtenir l'équilibre du fluide.....	19
Figure 2.6 Dispositifs expérimentaux	21
Figure 2.7 Spectre des gouttelettes d'eau	25
Figure 3.1 Épaisseur du fluide en fonction du temps sur la plaque inclinée à 5 °	31
Figure 3.2 Épaisseur du fluide en fonction du temps sur la plaque inclinée à 10 °	32
Figure 3.3 Épaisseur du fluide en fonction du temps sur la plaque inclinée à 15 °	33
Figure 3.4 Épaisseur du fluide en fonction du temps sur la plaque inclinée à 20 °	34
Figure 3.5 Épaisseur du fluide en fonction de l'inclinaison de la plaque à la position 25 mm.....	35
Figure 3.6 Influence de l'intensité de précipitations sur le temps de protection à -1 °C.....	41
Figure 3.7 Influence de l'intensité de précipitations sur le temps de protection à -2 °C.....	42
Figure 3.8 Influence de l'intensité de précipitations sur le temps de protection à -5 °C.....	43
Figure 3.9 Influence de l'intensité de précipitations sur le temps de protection à -10 °C.....	44

Figure 3.10 Influence de l'intensité de précipitations sur le temps de protection à -15 °C.....	45
Figure 3.11 Influence de la température sur le temps de protection à l'intensité de 5 g/dm ² h.....	47
Figure 3.12 Influence de la température sur le temps de protection à l'intensité de 5 g/dm ² h en représentation log-log.....	48
Figure 3.13 Paramètre n en fonction de la température à l'intensité de 5 g/dm ² h.....	49
Figure 3.14 Influence de l'inclinaison sur le temps de protection	53
Figure 3.15 Courbures des plaques modifiées en tête	55
Figure 3.16 Influence de la courbure à l'intensité moyenne de 5,5 g/dm ² h.....	56
Figure 3.17 Influence de la courbure à l'intensité moyenne de 21,2 g/dm ² h.....	56
Figure 4.1 Températures de congélation des solutions de glycol et d'eau en fonction du pourcentage de dilution en poids	60
Figure 4.2 Schéma de la plaque recouverte d'une pellicule de fluide FPD	66
Figure 4.3 Bilan volumique pendant un intervalle de temps Δt	68
Figure 4.4 Épaisseurs mesurées pour trois types de fluide en fonction des précipitations	72
Figure 4.5 Fonction échelon	73
Figure 4.6 Organigramme du programme de simulation du modèle 1	74
Figure 4.7 Épaisseurs mesurées et lissées à une intensité de 5,22 g/dm ² h.....	76
Figure 4.8 Épaisseurs mesurées et lissées à une intensité de 5,53 g/dm ² h.....	76
Figure 4.9 Épaisseurs mesurées et lissées à une intensité de 5,64 g/dm ² h.....	77

Figure 4.10 Densité et dilution du mélange fluide/eau calculées en fonction du temps avec le modèle 1 pour une intensité de 5,22 g/dm ² h.....	77
Figure 4.11 Densité et dilution du mélange fluide/eau calculées en fonction du temps avec le modèle 1 pour une intensité de 5,53 g/dm ² h.....	78
Figure 4.12 Densité et dilution du mélange fluide/eau calculées en fonction du temps avec le modèle 1 pour une intensité de 5,64 g/dm ² h.....	78
Figure 4.13 Épaisseur du fluide A344 à différents niveaux de dilution....	82
Figure 4.14 Méthode de détermination de l'épaisseur.....	83
Figure 4.15 Densité et dilution du mélange fluide/eau calculées en fonction du temps pour une intensité de 5,22 g/dm ² h (modèle 2).....	85
Figure 4.16 Densité et dilution du mélange fluide/eau calculées en fonction du temps pour une intensité de 5,53 g/dm ² h (modèle 2).....	85
Figure 4.17 Densité et dilution du mélange fluide/eau calculées en fonction du temps pour une intensité de 5,64 g/dm ² h (modèle 2).....	86
Figure 4.18 Comparaison des temps de protection calculés et mesurés pour différentes intensités de précipitations à -5 °C	88
Figure 4.19 Comparaison des temps de protection calculés et mesurés à différentes températures	89

Liste des photographies

Photo 2.1 Support réfrigéré utilisé pour les essais	13
Photo 2.2 Support réfrigéré monté sur la table mobile	14
Photo 4.1 Début du front de glace en haut de la plaque	62
Photo 4.2 Front de solidification uniforme.....	63
Photo 4.3 Front de solidification non-uniforme (plaquettes de glace).....	63

Notations

A	élément de surface au sommet de la plaque ($b \times L$)	m²
a	paramètre de calcul	µm
b	largeur du film fluide	m
c₀	concentration initiale du fluide	%
c₁	concentration du fluide correspondant à la température du fluide	%
D₀	dilution initiale du fluide	%
d	paramètre de calcul	µm
h₀	épaisseur initiale du fluide	m
I	intensité des précipitations	g/dm²h
K	indice d'incrément	--
L	longueur de l'élément au sommet de la plaque	mm
m_e	masse d'eau	kg
m_f	masse du fluide	kg
n	indice d'incrément de temps	--
R	rayon	cm
R_e	taux d'eau captée	µm/min
T_f	température du fluide	°C
t	temps: $t = n\Delta t$	s
t₀	temps initial	s
t_f	temps final	min.
t_i	temps de début d'amincissement	min
<hr/>		
v_f	volume du fluide	mm³

v_e	volume d'eau	mm^3
v_s	débit d'évacuation	m^3/s
β	inclinaison de la plaque	°
ρ_e	densité de l'eau	kg/m^3
ρ_{f0}	densité initiale du fluide	kg/m^3

CHAPITRE 1

Introduction

1.1 Problématique

En Amérique du Nord, les avions sont souvent exposés pendant l'hiver à des conditions atmosphériques en bas de 0 °C occasionnant la formation de glace sur les ailes, comme le brouillard givrant, la bruine, la pluie verglaçante et la neige. Les essais en soufflerie et en vol, exécutés au cours des dernières années, ont montré que la formation de glace sur les diverses composantes d'un avion peut diminuer la performance aérodynamique (Bragg and Gregorek, 1983 et Mikkelsen and al., 1985). Dans la situation de givrage au sol, l'avion ne peut donc pas décoller de façon sécuritaire. Les accidents au décollage, dus à la contamination par la neige et par la glace, ont été résumés par Jim 1988. Le dégivrage et la protection antigivre des avions au sol sont donc très importants.

Diverses techniques de dégivrage ont été développées depuis les débuts de l'aviation pour les avions au sol. Une des premières techniques consiste à enlever la glace et la neige de façon mécanique à l'aide de cordages ou de

boyaux d'incendie frottés sur l'aile ou le fuselage (Hill, 1988). Une autre méthode consiste à recouvrir les ailes du fuselage avec des bâches de protection afin d'empêcher la déposition de neige et de glace lorsque l'avion demeure stationné à l'aéroport pendant la nuit. Plusieurs de ces méthodes manuelles sont encore employées présentement dans les petits et les grands aéroports (Hill, 1988).

Avec la mise en service des gros transporteurs, le trafic aérien a augmenté et des techniques de dégivrage rapides et économiques comme celles utilisant les fluides FPD (freezing point depressant) ont été développées. Deux types de produits sont utilisés (Boeing Co., FAA Circular, 1982 et Association of European Airlines Task Force on De/Anti-icing, 1988): des dégivrants pour faire fondre la glace, la neige ou pour enlever la glace ou le givre accumulé pendant le vol précédent, et des antigivre pour protéger les parties exposées contre tout nouveau dépôt de glace. Les dégivrants sont classés comme étant des fluides de type I et les antigivre, de type II.

Présentement, les fluides FPD de type I sont largement employés pour dégivrer les avions. Les produits utilisés en Amérique du Nord, sont des mélanges d'éthylène glycol ou de propylène glycol additionnés d'agents inhibiteurs et mouillants. En Europe, le dégivrant AEA type I est un produit qui contient au moins 80 pour-cent de monoéthylène glycol. Sa viscosité est celle d'un fluide newtonien, c'est-à-dire fonction seulement de la température et indépendante du cisaillement.

Les produits de type II, qui protègent plus longtemps que ceux de type I, particulièrement pendant les précipitations, sont utilisés en Europe et en Amérique du Nord. Le fluide type II est un fluide pseudo-plastique plus épais que le type I, qui contient environ 50 pour-cent de glycol. Sa viscosité est celle d'un fluide non-newtonien, pseudo-plastique, c'est-à-dire fonction de la température et du cisaillement.

Les temps de protection des fluides de type I contre les précipitations de glace sont seulement de quelques minutes. Le grand avantage du fluide type II est d'assurer une protection contre les précipitations de glace avec une marge de sécurité importante, particulièrement aux aéroports où les temps d'attente peuvent être supérieurs à 30 minutes. Mais le fluide résiduel encore en place au moment du décollage peut occasionner une perte de portance et une augmentation de la traînée au décollage (Hendrickson and Hill, 1987 et Hill and Zierten, 1993). L'étude de ces effets ne fait pas partie du présent travail, c'est pourquoi on ne discutera pas de ces problèmes dans ce mémoire.

Les fluides dégivrants ou antigivre commerciaux sont disponibles depuis une dizaine d'années. L'Association Européenne de Lignes Aériennes (AEA) a déjà établi une procédure normalisée pour contrôler la qualité des fluides relativement aux temps de protection et à la performance aérodynamique dans des conditions atmosphériques défavorables (Association of European Airlines Task Force on De/Anti-icing, 1988). Deux types d'essai normalisés ont été développés pour évaluer les temps de protection des fluides (Laforte et al., 1988, 1990, 1992).

1. L'essai d'endurance à l'eau pulvérisée surfondue, visant à simuler **des conditions de bruine et de pluie verglaçante.**
2. L'essai d'endurance au givrage humide, visant à évaluer la capacité du fluide à empêcher la formation de la gelée.

L'évaluation de ces produits en conditions naturelles de neige et de glace a fait ressortir toutefois une très grande dispersion dans les temps de protection mesurés par comparaison aux valeurs obtenues dans les essais de laboratoire, de même qu'une grande variabilité dans les conditions météorologiques répertoriées. En effet, si les résultats des deux dernières campagnes 92' et 93' (APS Aviation Inc., 1993) ont mis en évidence la dépendance de la durée de protection vis-à-vis l'intensité des précipitations, les variations observées sont toutefois beaucoup plus étendues que celles obtenues en laboratoire. Ceci peut s'expliquer en partie en raison de ce que les paramètres météorologiques, température, vitesse du vent et humidité, fluctuent considérablement, comparativement aux valeurs maintenues constantes en laboratoire. D'autre part, les temps de protection sur une aile ne correspondent pas directement à ceux mesurés en laboratoire. Ces observations indiquent le niveau insuffisant de l'état des connaissances scientifiques relatives aux facteurs influençant les temps de protection des produits dégivrants et antigivre.

1.2 Objectifs

L'objectif du travail est d'étudier de façon systématique les effets de différents paramètres extérieurs au fluide susceptibles d'affecter le temps de protection des produits antigivre. Ce travail vise entre autres à identifier les paramètres environnementaux les plus importants de même que l'effet de l'inclinaison. Les résultats obtenus constitueront une base de données qui servira à l'élaboration et à la validation de deux modèles simples capables de décrire la progression du front de glace dans un film de ces produits à différents taux de dilution de même que de prédire le temps de protection.

1.3 Méthodologie

La réalisation des objectifs mentionnés au paragraphe précédent est obtenue à partir d'approches expérimentales et numériques. Pour le volet expérimental, le fluide antigivre et ses dilutions sont exposés aux précipitations froides à des intensités de glace comprises entre 0,3 et 20 g/dm²h et des températures entre -1 et -15 °C. Cette expérimentation sera effectuée dans une des chambres climatiques du GRIEA, en utilisant des plaques planes et courbées à différentes inclinaisons simulant une aile. Pendant les essais, les temps de protection du fluide, correspondant à différentes longueurs de front de glace formée sur les plaques planes et courbées, sont mesurés. Le volet

numérique comprend deux parties. La première partie consiste à analyser les résultats des essais afin d'établir une relation entre les temps de protection du fluide, l'intensité des précipitations, la température, et l'inclinaison de la plaque. La seconde partie est réservée à l'élaboration de deux modèles simples capables de prédire les temps de protection du fluide à partir des niveaux de dilution.

1.4 Plan de travail

Les étapes spécifiques du travail sont les suivantes:

1. Mesure de l'épaisseur des fluides pour différentes inclinaisons de la plaque,
2. Mesure des effets de l'intensité des précipitations et de la température sur le temps de protection,
3. Mesure des effets de l'inclinaison sur le temps de protection,
4. Mesure des effets de la courbure sur le temps de protection,
5. Élaboration des modèles simples capables de prédire les temps de protection du fluide,
6. Validation des modèles proposés par les résultats expérimentaux obtenus dans le présent travail.

CHAPITRE 2

Méthodes expérimentales

2.1 Introduction

Le présent chapitre décrit les différentes méthodes expérimentales mises en place pour évaluer la performance des fluides dégivrants ou antigivre utilisés sur les avions dans des conditions atmosphériques en bas de 0 °C. Ces méthodes expérimentales comprennent la simulation des précipitations froides et la simulation de l'aile d'avion lors d'essais en laboratoire.

2.2 Chambre climatique

La simulation des conditions de glace est réalisée dans une chambre climatique de 3,3 mètres de hauteur en place à l'Université du Québec à

Chicoutimi. Un schéma de la chambre est présenté à la figure 2.1. Le refroidissement est assuré par un compresseur de 7,5 kW, l'air froid circulant à un débit de $4 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour garder le mouvement de l'air constant et uniforme dans la zone de l'expérience, deux panneaux déflecteurs en bois (en pointillés sur la figure 2.1) sont installés au centre de la chambre climatique. Un enregistrement typique de la température de l'air est présenté à la figure 2.2. La variation de température montrée à la figure 2.2 reste comprise dans un intervalle de $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

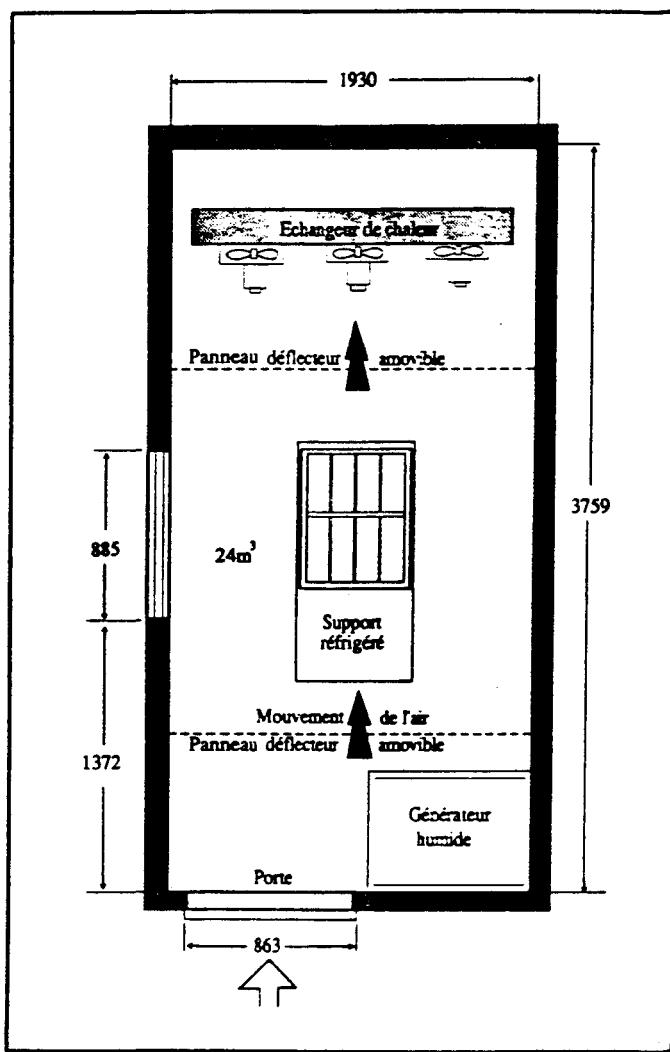


Figure 2.1 Schéma de la chambre climatique

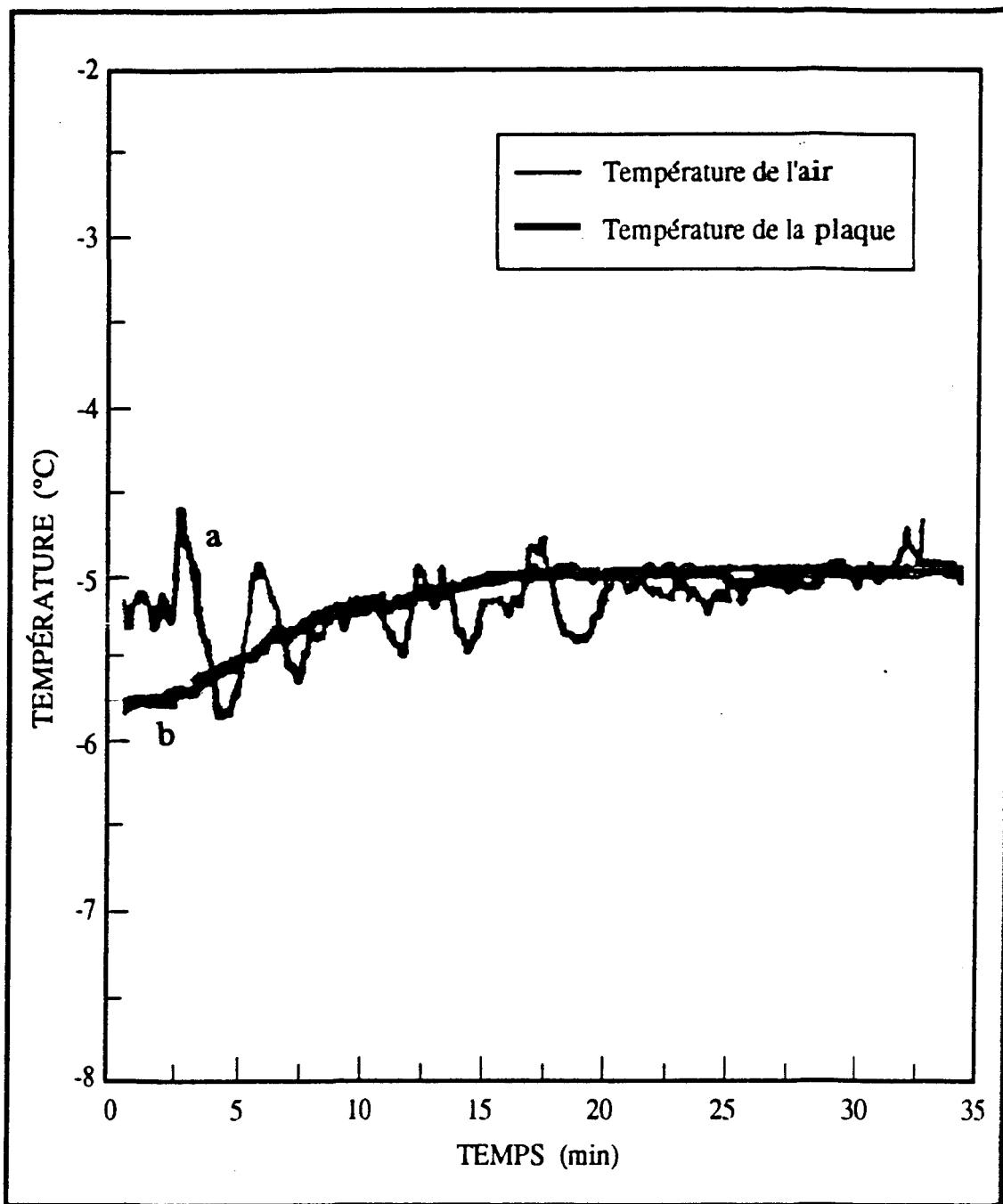


Figure 2.2 Enregistrement de la température ($I = 14 \text{ g/dm}^2\text{h}$)

- a) Température de l'air
- b) Température des plaques

2.3 Simulation de l'aile d'un avion

2.3.1 Masse thermique

La simulation de la masse thermique de l'aile d'un avion est effectuée à l'aide d'un support réfrigéré sur lequel il est possible de mettre huit plaques amovibles en aluminium (figure 2.3). Ce support se compose de deux unités séparées, chacune logeant quatre plaques numérotées de un à quatre (photo 2.1 et figure 2.3). Ce support est installé sur une table inclinable à 0, 5, 10, 15, et 20 ° suivant les besoins des expériences. Cette inclinaison sert à imposer aux fluides appliqués sur les plaques, un angle qui soit comparable à celui existant sur la surface courbe d'une aile d'avion. Le système de réfrigération des plaques est opéré de façon indépendante de celui de la chambre climatique.

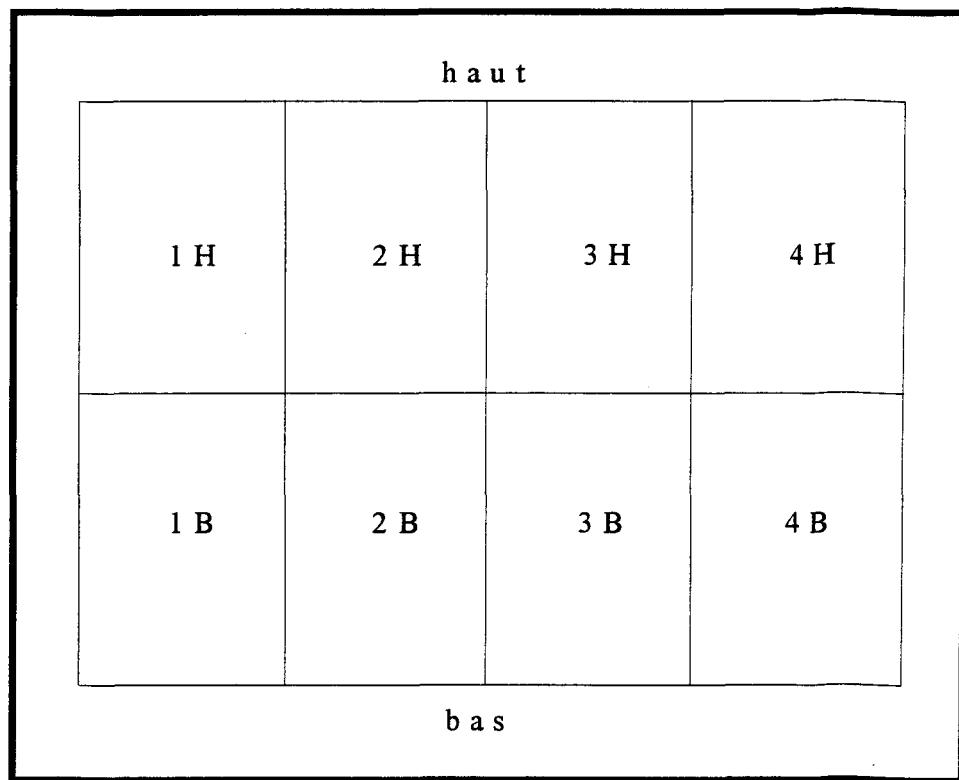


Figure 2.3 Disposition des plaques sur le support réfrigéré

Les plaques du haut sont identifiées par la lettre H et celles du bas sont identifiées par la lettre B (figure 2.3). Chaque unité consiste en un bloc d'aluminium rectangulaire ($30\text{cm} \times 45\text{cm} \times 5\text{cm}$) dans lequel ont été creusés des canaux. L'éthylène glycol refroidi par une petite unité réfrigérée (HAAKE PK 50) est recirculé dans ces canaux afin de maintenir le bloc d'aluminium et les plaques installées en surface à la température cible. Les plaques sont faciles à enlever et peuvent être fixées sur l'unité par des trombones d'aluminium qui assurent un bon contact avec le support. Chaque plaque est séparée l'une de l'autre à l'aide d'une pièce de polyéthylène de 0,5 centimètre de large. Des panneaux de mousse de polyuréthane servent à isoler les cotés et la base de façon à empêcher la formation de givre. En bas de chaque unité, deux

gouttières recueillent l'excédent de fluide coulant sur les plaques lors de l'essai. La photo 2.2 montre le montage installé dans la chambre climatique.

La figure 2.2 précédente donne un exemple d'enregistrement de la température de l'air et des plaques en fonction du temps. Sur cette figure, on remarque, au début de l'enregistrement, une augmentation de la température de la plaque inférieure à $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Cette augmentation de température est due à l'établissement d'un équilibre entre la température de la plaque et celle du fluide, les fluides étant appliqués à la température ambiante ($\approx 22^{\circ}\text{C}$). Le temps nécessaire au retour à la température cible (-5°C) est ici de l'ordre de 15 minutes, ce qui caractérise l'inertie thermique du support.

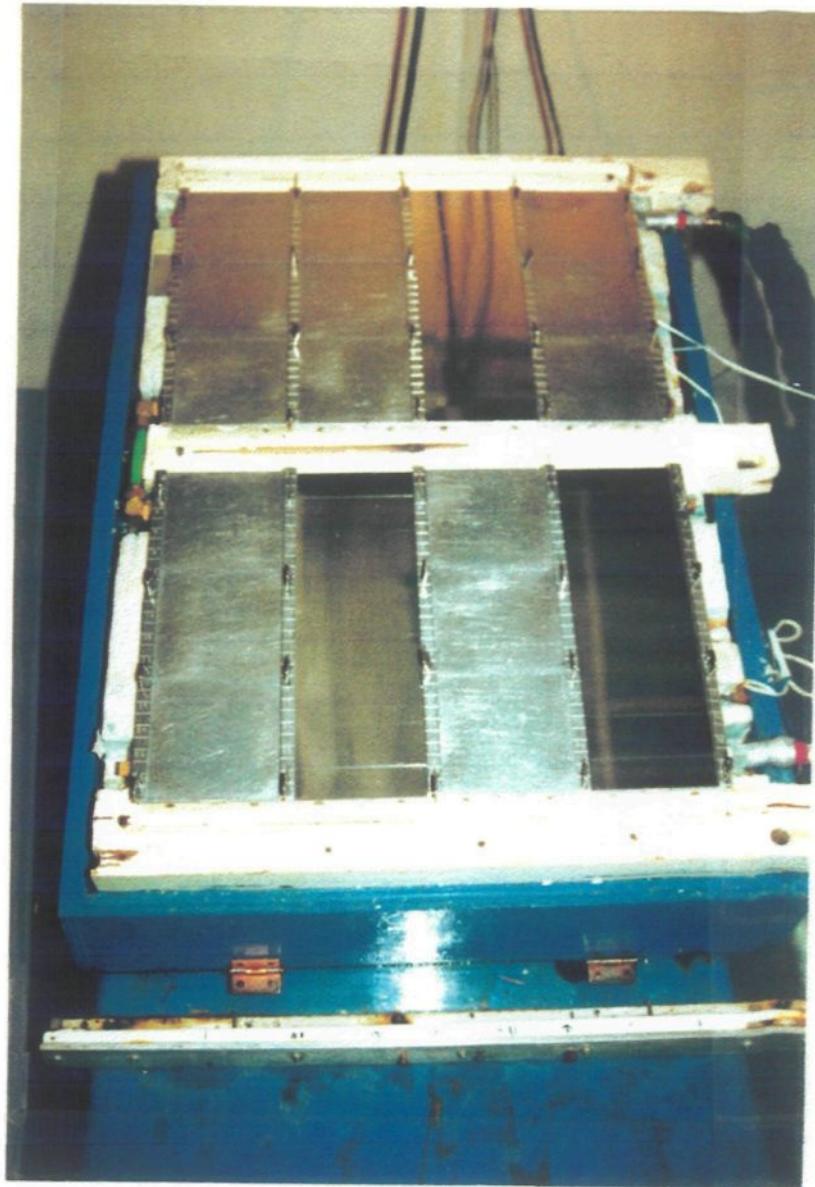


Photo 2.1 Support réfrigéré utilisé pour les essais



Photo 2.2 Support réfrigéré monté sur la table mobile

2.3.2 Surface de l'aile d'un avion

La surface exposée de l'aile d'un avion est simulée par une plaque polie inclinable en alliage d'aluminium. La plaque mesure 10 centimètres de large par 30 centimètres de long. Le fini de surface, correspondant à une rugosité moyenne R_e de 2 μm , est celui d'un miroir, ce qui diffère du fini rencontré sur les avions.

La température de la plaque est mesurée par une thermistance reliée à un enregistreur à affichage numérique (COLE PARMER 8502-25) de précision $\pm 0,05$ °C. Le tableau 2.1 représente les températures enregistrées en surface des plaques aux quatre positions sur les unités. Le tableau 2.1 montre aussi la température du glycol mesurée à l'entrée et à la sortie des deux unités.

Tableau 2.1 Température (°C) des plaques à différentes positions sur le support

Trombones	Positions				Température du glycol	
	1	2	3	4	Entrée	Sortie
avec	-5,70	-5,60	-5,60	-5,58	-5,95	-5,76
sans	-5,10	-4,90	-4,98	-4,94	-5,95	-5,76

Le tableau 2.1 présente les mesures de température effectuées dans deux contextes particuliers; dans le premier cas, les plaques sont maintenues en place à l'aide de trombones tandis que dans le second, elles sont tout simplement déposées sur l'unité sans les trombones (Tableau 2.1). On notera que dans la première situation, la température de plaque est de 0,5 °C plus basse que dans

la seconde situation. Sur la tableau 2.1 on remarque aussi que la température de la plaque ne varie pas de façon significative avec la position de la plaque sur le support. On peut donc considérer avec ce système de fixation retenu, que la température reste uniforme à l'erreur expérimentale près pour les quatre plaques montées sur le support.

2.4 Application du fluide

Le fluide (A344) utilisé dans les essais est un produit expérimental dont les propriétés physiques de ce produit sont résumées aux tableaux 2.3 et 2.4.

Tableau 2.2 Caractéristiques du produit antigivre A344

Point d'ébullition (à 760 mmHg)	108 °C
Point de congélation	-41 °C
Densité (à 20°C)	1,08
Tension de vapeur (20 °C)	15 mmHg
Densité de vapeur (air = 1)	~2,1
Solubilité dans l'eau	100 %
% volatiles par volume	0
Taux d'évaporation(acétate de butyle = 1)	<0,01
Ph (19 °C)	6,74
Indice de réfraction (20°C)	1,4116
Tension superficielle (18 °C)	33 dynes/cm

Tableau 2.3 Viscosité Brookfield (mPa.s)

Températures	0,3 RPM	6 RPM	30 RPM
+20°C	8500	1170	494
0°C	10500	1600	740
-10°C	10100	1835	913
-20°C	9200	2050	1220
-25°C	8300	2200	1448

De façon à simuler le plus possible le contexte de l'application de produits dans les aéroports, la procédure suivante est utilisée pour l'application de fluide antigivre sur les plaques. La procédure utilisée est dérivée de celle spécifiée dans les normes AMS1424 et AMS1428 équivalentes aux normes internationales ISO11075 et ISO11078. D'abord le fluide et les plaques sont placés dans la chambre climatique de façon à ce que le fluide, les plaques et l'air soient à la même température. Le fluide contenu dans un bêcher est versé à la main sur les plaques inclinées jusqu'à ce qu'elles soient recouvertes complètement. De façon à déterminer la quantité minimale de fluide devant être appliquée, on a mesuré en fonction du temps la diminution du poids du fluide appliqué sur la plaque. Le montage est composé d'une seule plaque inclinée tel que montré à la figure 2.4. Pour cette mesure, on utilise différents volumes de fluide qui sont versés sur la plaque à -5 °C, le fluide étant refroidi au préalable à -5 °C.

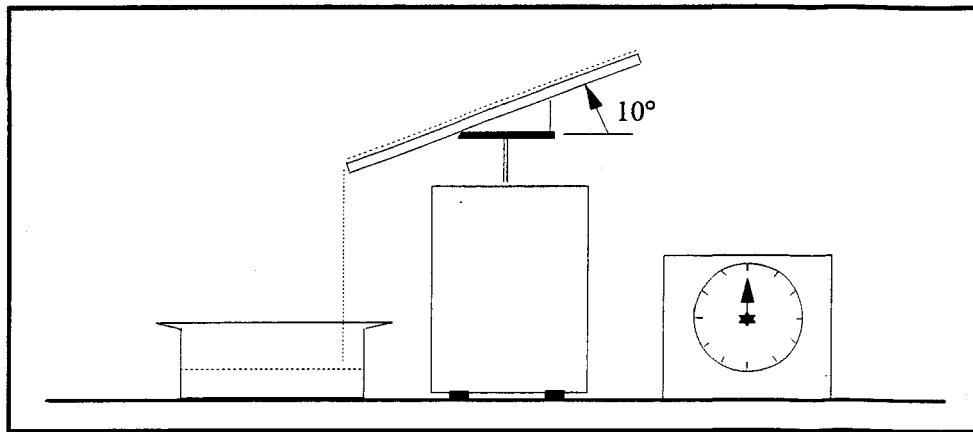


Figure 2.4 Montage utilisé pour la mesure du volume minimal

La figure 2.5 montre le poids du fluide antigivre mesuré en fonction du temps pour six valeurs différentes: 50, 80, 90, 120, 160 et 200 g. Sur la figure 2.5, on remarque que la diminution du poids de fluide sur la plaque est très rapide durant les cinq premières minutes; ensuite le poids tend à se stabiliser vers une valeur constante; de plus, cette valeur ne semble pas dépendre du poids appliqué initialement. Un temps de cinq minutes ressort comme le temps minimum pour obtenir une pellicule stable sur la plaque. Le poids du fluide encore en place après 5 minutes, multiplié par un coefficient de sécurité de 1.5, est considéré ici comme celui minimum nécessaire pour recouvrir toute la surface de la plaque.

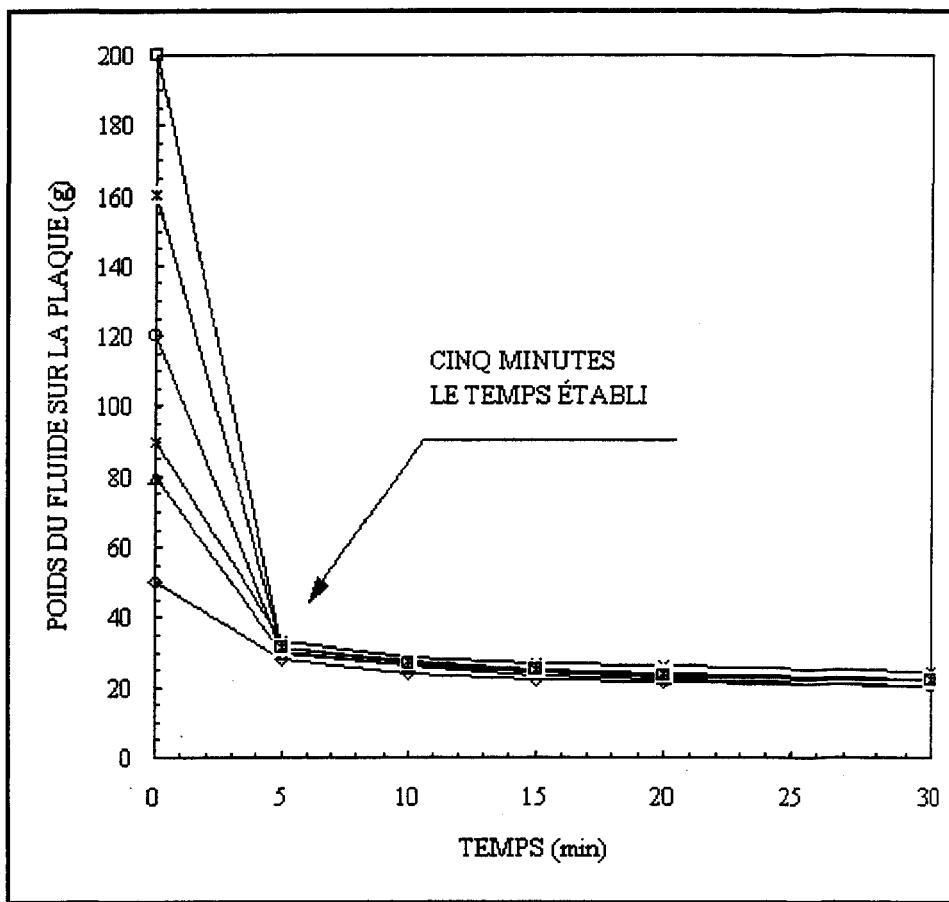


Figure 2.5 Temps pour obtenir l'équilibre du fluide

Après les cinq minutes nécessaires pour obtenir l'équilibre du fluide sur les plaques, la pellicule de fluide en surface de la plaque ne recouvre pas uniformément la plaque en raison de son inclinaison. L'épaisseur tend à diminuer en haut de la plaque et à augmenter en bas de la plaque. Cette distribution du fluide sur la plaque inclinée est illustrée au tableau 2.4 où sont présentées les épaisseurs de fluide mesurées à trois positions différentes soit à 2,5 cm en haut de la plaque, au milieu (150 cm) et à 2,5 cm du bas de la plaque pour quatre inclinaisons, 5, 10, 15 et 20 °.

Tableau 2.4 Épaisseurs du fluide à trois positions sur la plaque

Inclinaison	Épaisseur (μm)		
	Haut*	Milieu	Bas**
$\beta = 5^\circ$	711	1080	1270
$\beta = 10^\circ$	508	826	953
$\beta = 15^\circ$	356	610	711
$\beta = 20^\circ$	305	508	660

* 2,5 cm du haut

** 2,5 cm du bas

L'épaisseur du fluide sur la plaque inclinée dépend de plusieurs facteurs qui seront analysés plus en détail au Chapitre 3.

2.5 Génération des précipitations

2.5.1 Dispositif expérimental

Les dépôts de glace sont obtenus à partir de la congélation de gouttelettes d'eau surfondues générées par un gicleur air-eau oscillant placé à 1,25 m au dessus du support (voir la figure 2.6). L'angle du gicleur et la distance verticale entre le gicleur et le support sont ajustables. L'intensité des précipitations de glace est contrôlée en variant le débit d'une pompe péristaltique. La grosseur des gouttelettes peut être variée par le réglage des pressions d'air et d'eau alimentant le gicleur. L'augmentation de la pression d'air et la diminution de la pression d'eau tendent à créer une réduction du diamètre

volumique médian (DVM) des gouttelettes, tandis que l'augmentation de pression d'eau accroît leur taille.

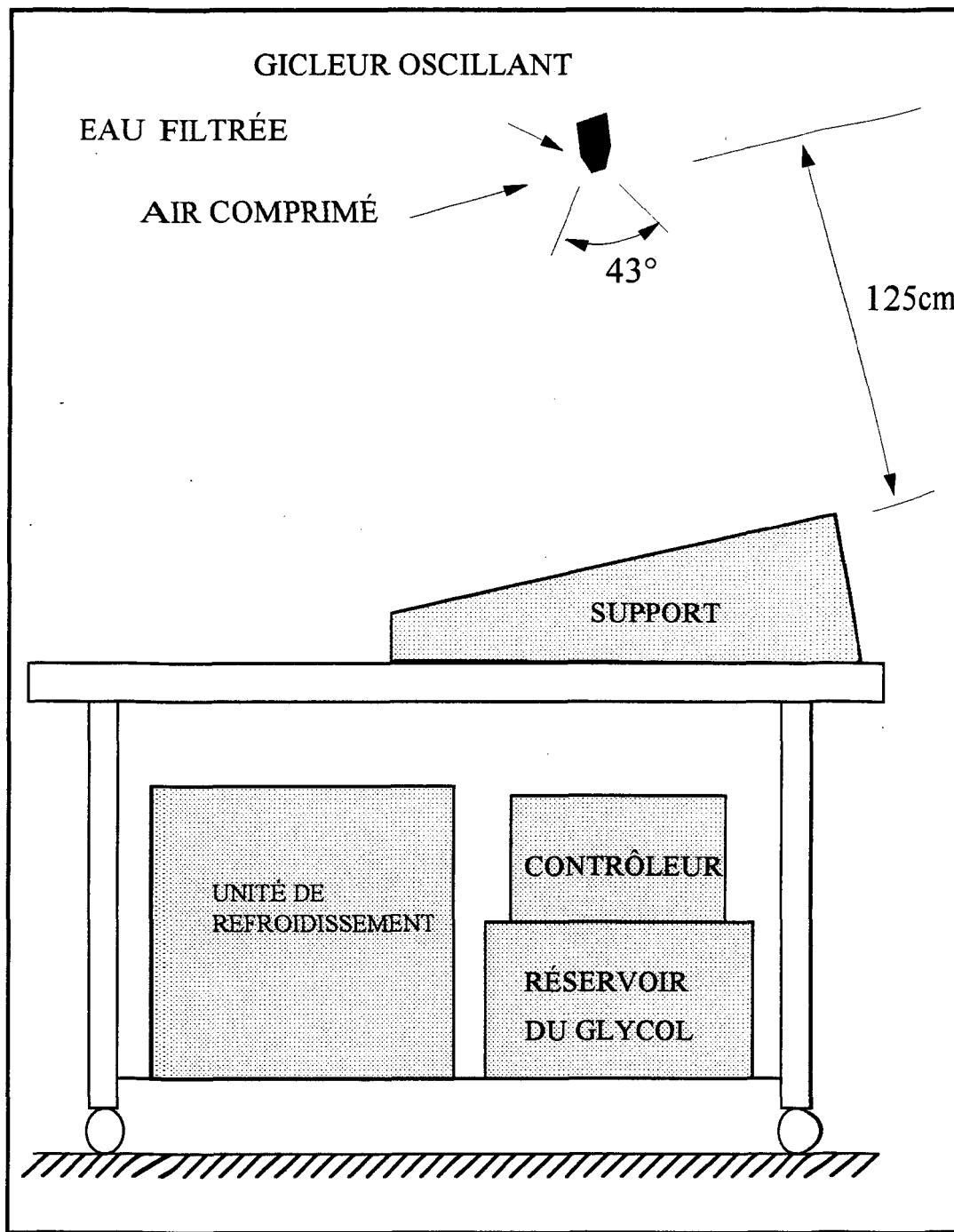


Figure 2.6 Dispositifs expérimentaux

Pour éviter le gel à l'orifice du gicleur pendant les essais ou dans l'intervalle entre deux essais, le gicleur et les tubes d'alimentation en eau et en air sont chauffés au dessus de 0 °C par des fils chauffants.

2.5.2 Distribution uniformisée des précipitations de glace

Les précipitations de glace, dont l'intensité doit pouvoir être choisie entre 0,5 et 40 g/dm²h, doit être distribuée de façon la plus uniforme possible sur toute la surface du support. Afin d'établir le niveau d'uniformité, des essais préliminaires ont été exécutés sans fluide par ajustement des débits et des pressions d'eau et d'air de façon à trouver les réglages adéquats capables de produire un givrage aussi uniforme que possible. Les résultats de quelques-uns de ces essais de calibration sont présentés au tableau 2.5 avec leurs conditions particulières. L'intensité de la pluie verglaçante est représentée ici par le poids moyen de la glace (PMG) sur toutes les plaques. Le PMG est sensible aux paramètres mentionnés précédemment. Dans nos essais, l'intensité des précipitations est donnée par la valeur moyenne des poids de glace mesurés sur toutes les plaques, cette dernière étant calculée par l'équation suivante:

$$I_{\text{moyenne}} = \frac{\text{poids de glace moyen}}{\text{surface de plaque} \times \text{temps}} \quad (2.1)$$

Tableau 2.5 Résultats des essais de calibration

N° d'essai	Conditions				
	Débit d'eau (ml/min)	P _a (psi)	P _e (psi)	h (cm)	PMG (g/dm ² h)
C1	46	18	10	125	5,14±0,12
C2	38	17	8	125	4,29±0,19
C3	25	17	10	125	1,86±0,13
C6	29	18	10	125	2,45±0,22
C13	15	17	5	125	0,29±0,05
C14	60	18	10	125	8,88±0,49
C20	75	20	10	125	9,80±0,66

P_a: Pression d'airP_e: Pression d'eau

h: Distance verticale entre le gicleur et le support

PGM: Poids moyen de glace

L'intensité de précipitations est très sensible à la pression d'eau, à la pression d'air et à la distance du gicleur au support. Une méthode par essais et erreurs est utilisée pour ajuster tous les paramètres aux valeurs d'intensité désirées. Le tableau 2.6 présente les valeurs des paramètres correspondant à l'essai normalisé.

On utilise, pour alimenter le gicleur, de l'eau du robinet de conductivité électrique de 94 µS et d'un pH de 7.2.

Tableau 2.6 Paramètres retenus pour l'essai standard d'endurance à l'eau pulvérisée

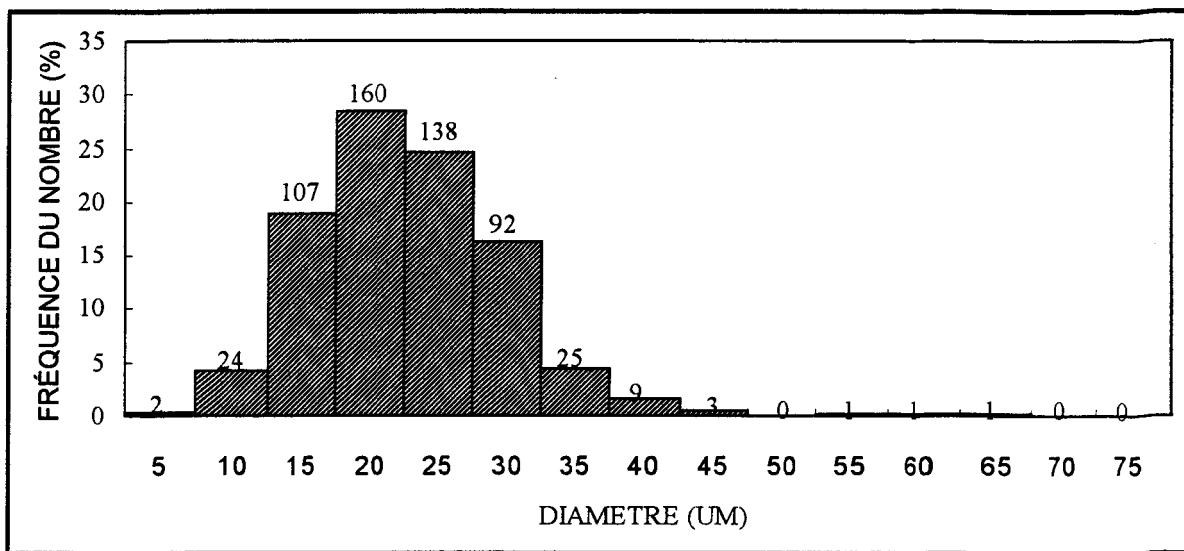
Type de gicleur	671447 SS
Angle de la plaque	10 °
Distance verticale	1,25 m
Pression d'air	18 psi
Pression d'eau	10 psi
Diamètre moyen des gouttelettes	20 µm
% des gouttelettes entre 15 et 35 µm	83 %
Débit d'eau	46 ml/min
Température des plaques	-5 °C
Température de l'eau	-5 °C

2.5.3 Mesure du spectre des gouttelettes

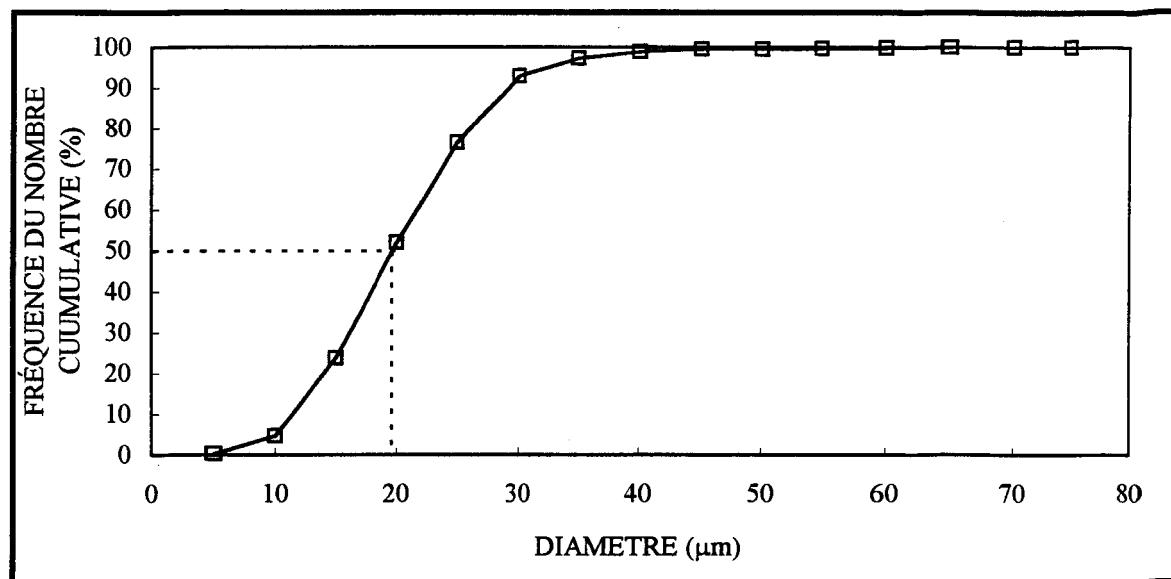
Le spectre des gouttelettes est mesuré à l'aide de la méthode dite du collargol (Golitzine, 1951), utilisant un film déformable de collargol déposé en surface d'une lame de verre exposée au flux de gouttelettes pendant un temps de l'ordre de 0,1 seconde. Dans cette méthode, le diamètre des traces résiduelles laissées par les gouttelettes représente environ trois fois leur diamètre réel (Godard, 1960); cette correspondance est valable pour toute la gamme de vitesses d'impact et de grosseur de gouttelettes produites. La grosseur et le nombre des gouttelettes sont mesurés, soit directement au microscope, ou à partir de microphotographies des traces laissées en surface de lames de verre.

La figure 2.8 montre la distribution des gouttelettes générées dans les conditions correspondant à celles obtenues dans l'essai d'endurance à l'eau

pulvérisée. La moyenne des diamètres des gouttelettes appartenant à cet histogramme est de 20 μm avec 83 % des gouttelettes présentant des diamètres compris entre 15 et 35 μm .



a) Histogramme



b) Distribution cumulative
Figure 2.7 Spectre des gouttelettes d'eau

2.6 Procédure générale d'essai

Dans notre travail, tous les essais sont exécutés avec six plaques inclinées par rapport à l'horizontale, trois étant recouvertes de fluide et trois autres servant à déterminer l'intensité des précipitations à partir de la masse de glace déposée sur des plaquettes de 10×10 cm. Après les cinq minutes nécessaires pour obtenir les conditions d'équilibre, les plaques sont exposées aux précipitations selon la procédure décrite à la section précédente. Pendant les essais, les temps de protection sont déterminés visuellement à l'extérieur de la chambre climatique à travers une fenêtre. Lorsque nécessaire, la mesure est effectuée à l'intérieur de la chambre. La progression du front de glace a été, à quelques reprises, enregistrée avec une caméra vidéo. Les photos illustrant le front de glace observé dans les essais sont montrées dans le chapitre 4.

Les temps de protection sont ici caractérisés par quatre intervalles de temps comptés à partir du début de l'exposition de la plaque recouverte de fluide aux précipitations givrantes, soit cinq minutes après l'application du fluide sur la plaque. Ces temps servent à décrire la progression du front de glace dans le film liquide de produit antigivre recouvrant la plaque préalablement traitée.

- DÉBUT: temps de formation du premier dépôt de glace visible,
- FIE: temps nécessaire pour qu'un premier cristal de glace atteigne la ligne tracée à 2,5 cm en haut de la plaque. Il s'agit du temps de protection standard qui qualifie les produits commerciaux,
- MIT: temps nécessaire pour que l'ensemble du front de glace atteigne une longueur moyenne de 2,5 cm,
- PIL: longueur du front de glace 30 minutes après le début des précipitations surfondues.

Étant donnée la nature aléatoire de germination des premiers cristaux de glace, le temps DÉBUT est caractérisé par une incertitude importante. Pour obtenir une donnée quantitative répétitive, on utilise le temps de formation de 2,5 cm de glace dans l'essai standard. En effet des essais préliminaires ont montré qu'à cette distance, les variations de temps dues aux délais dans la germination ne sont plus significatives. On notera que, physiquement, le temps MIT permet d'ignorer les inégalités latérales de la progression de la glace. Cependant, l'essai normalisé étant un essai de qualification, c'est la première apparition d'une longueur de 2,5 cm de glace qui est utilisée comme résultat dans le test normalisé.

Après chaque essai, l'intensité des précipitations est calculée à partir du poids de la glace mesuré sur neuf plaquettes de 10×10 cm non recouvertes de fluide.

Dans tous les essais, les températures de l'air et des plaques ont été enregistrées en fonction du temps à l'aide de thermistances et de thermocouples. À la fin, l'épaisseur du fluide en fonction du temps a été également mesurée pour les différentes inclinaisons des plaques.

CHAPITRE 3

Résultats expérimentaux

3.1 Épaisseur du fluide

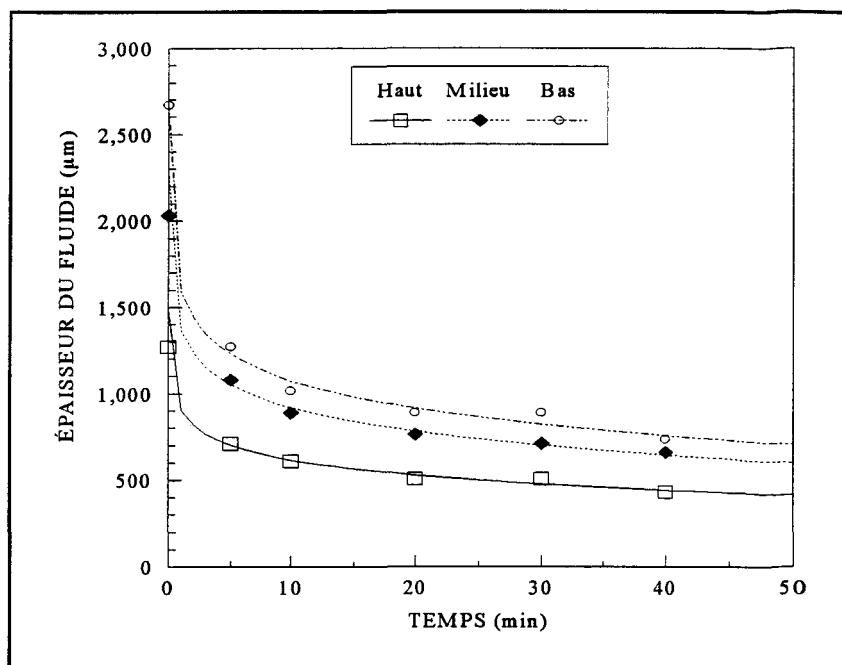
Le fluide FPD est tout d'abord versé sur les plaques inclinées où il forme une pellicule mince sur toute la surface. L'épaisseur du film en surface est influencée par l'inclinaison de la plaque, la température du fluide contrôlant la viscosité et sa tension superficielle. Cependant l'épaisseur de la couche dépend principalement de l'inclinaison de la plaque.

Les mesures d'épaisseurs sont exécutées pour quatre inclinaisons, 5, 10, 15 et 20° dans des conditions identiques de $-5 \pm 0,5$ °C. Pour chaque inclinaison, les épaisseurs du fluide sont mesurées à 25 mm, 150 mm, et à 275 mm, ces distances étant comptées à partir du sommet de la plaque. Les mesures sont prises avec une jauge d'épaisseur du fluide donnant une précision de l'ordre de ± 25 µm entre 0 et 305 µm, ± 50 µm entre 356 µm et 762 µm et ± 127 µm entre 889 µm et 2032 µm. Les mesures ont été prises à la fin de l'application du fluide sur la plaque.

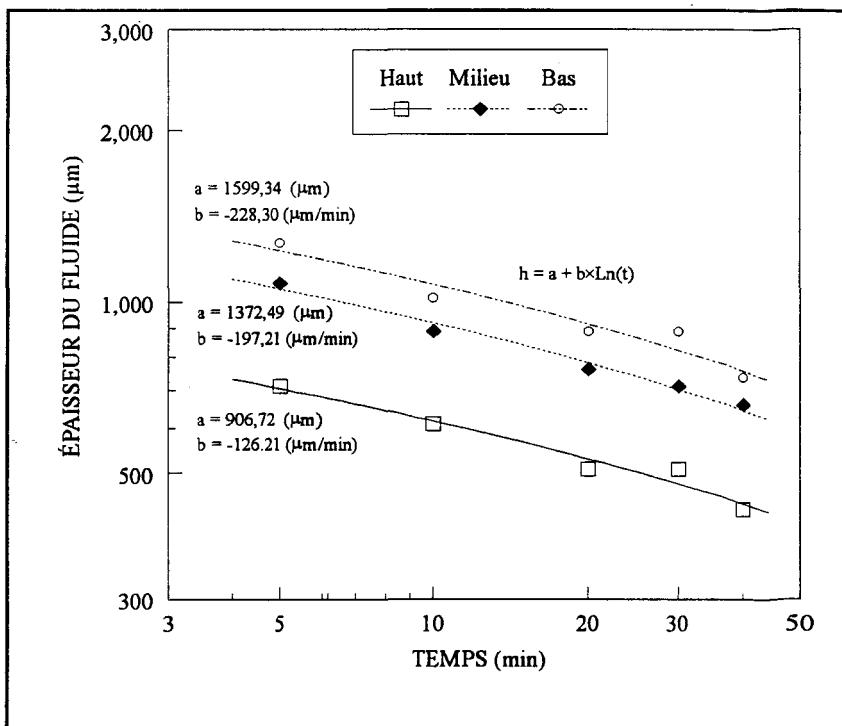
Les résultats obtenus, compilés au tableau 3.1, sont consignés aux figures 3.1, 3.2, 3.3 et 3.4. La figure 3.5 montre les effets de l'inclinaison et la position sur l'épaisseur du fluide sur la plaque.

Tableau 3.1 Épaisseurs (μm) mesurées en fonction du temps pour différentes positions et inclinaisons des plaques

Inclinaison β ($^{\circ}$)	Position	Temps (min)					
		0	5	10	20	30	40
5	Haut (25 mm)	1270	711	610	508	508	432
	Milieu (150 mm)	2032	1080	889	762	711	660
	Bas (275 mm)	2667	1270	1016	889	889	737
10	Haut (25 mm)	1207	508	457	356	305	267
	Milieu (150 mm)	1651	826	660	559	485	483
	Bas (275 mm)	1905	953	762	660	610	559
15	Haut (25 mm)	889	356	279	254	203	165
	Milieu (150 mm)	1461	610	508	457	356	292
	Bas (275 mm)	1461	711	635	508	483	406
20	Haut (25 mm)	737	305	242	203	191	152
	Milieu (150 mm)	953	508	432	331	279	279
	Bas (275 mm)	1270	660	534	406	356	305

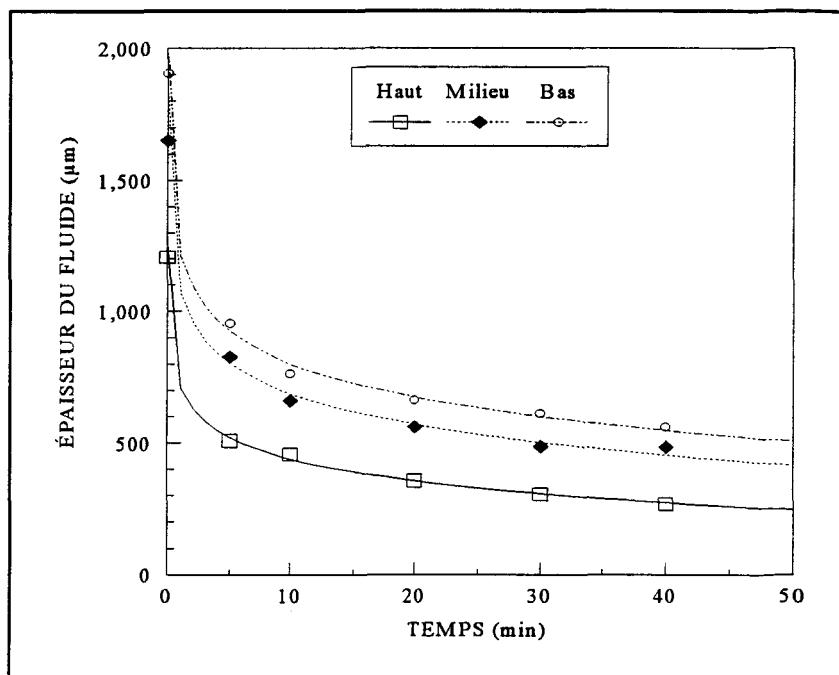


(a) Dans les coordonnées linéaires

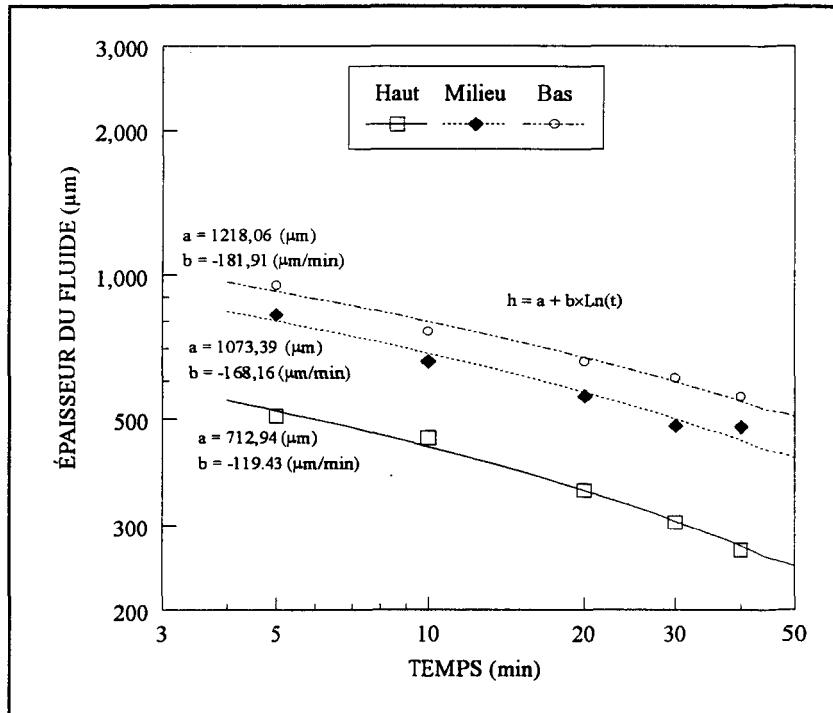


(b) Dans les coordonnées logarithmiques

Figure 3.1 Épaisseur du fluide en fonction du temps sur la plaque inclinée à 5 °

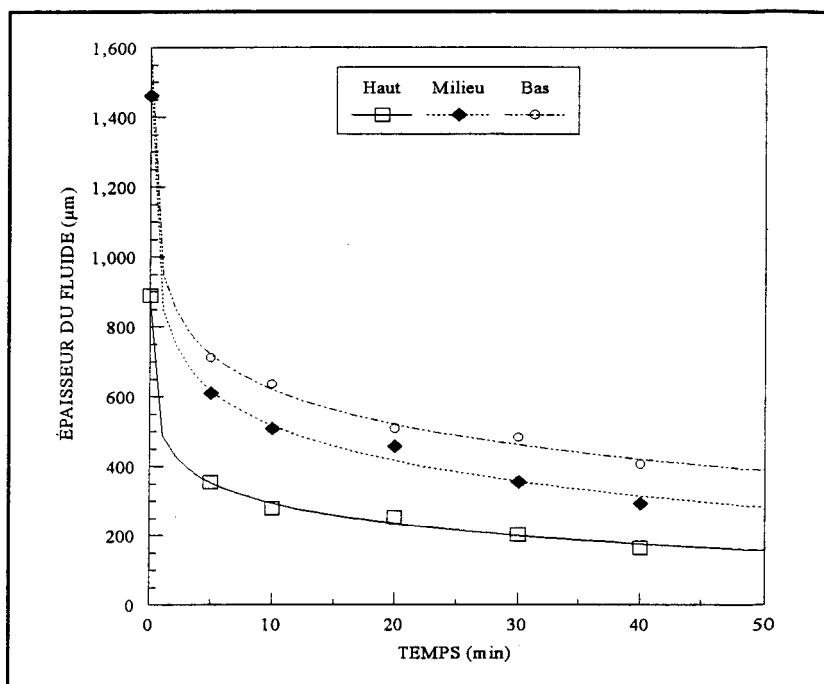


(a) Dans les coordonnées linéaires

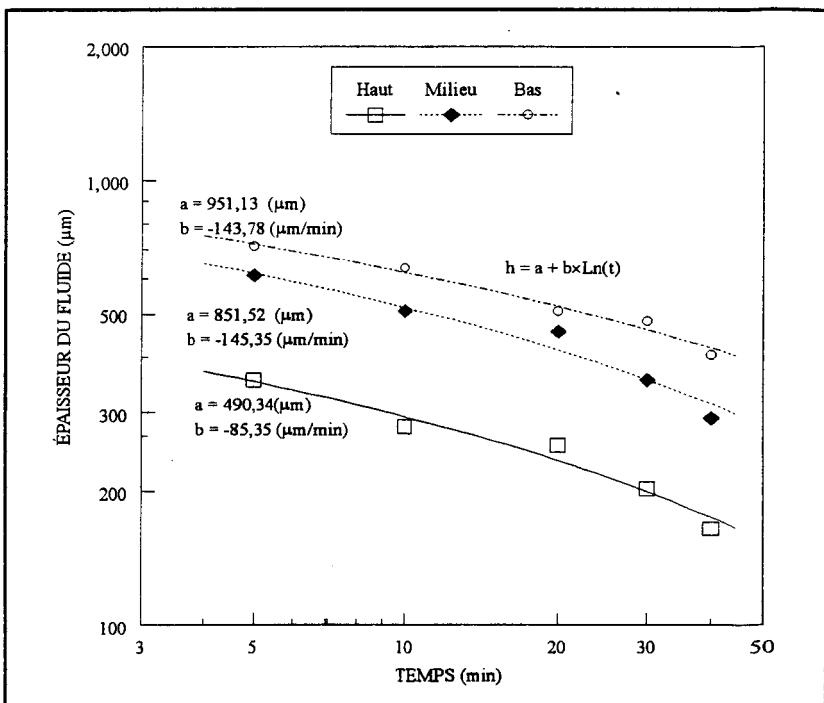


(b) Dans les coordonnées logarithmiques

Figure 3.2 Épaisseur du fluide en fonction du temps sur la plaque inclinée à 10 °

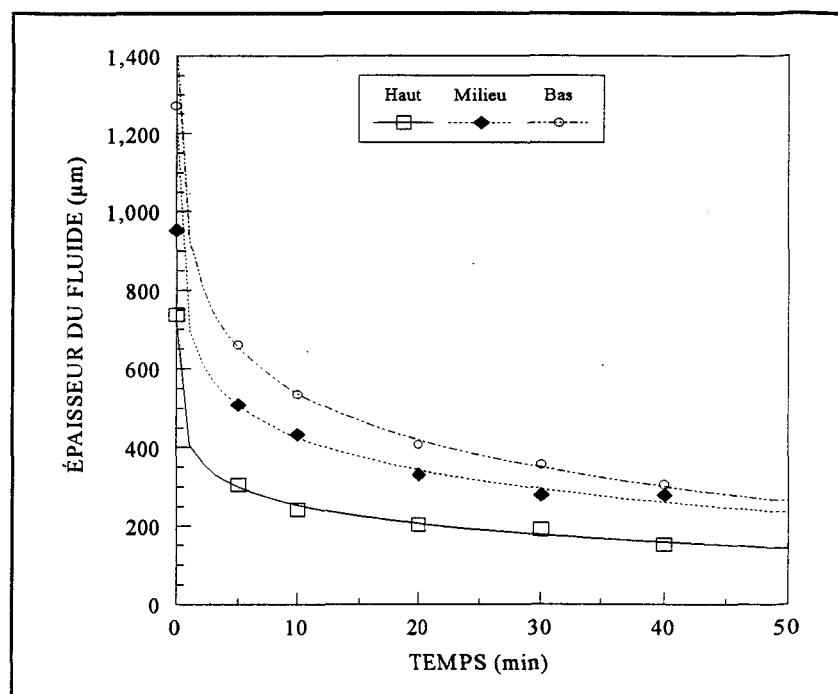


(a) Dans les coordonnées linéaires

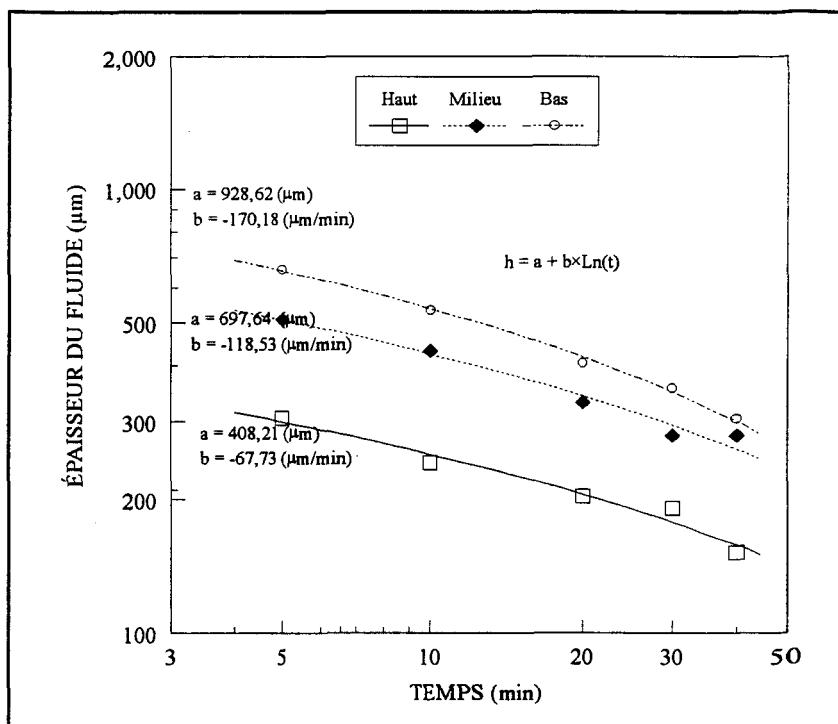


(b) Dans les coordonnées logarithmiques

Figure 3.3 Épaisseur du fluide en fonction du temps sur la plaque inclinée à 15°



(a) Dans les coordonnées linéaires



(b) Dans les coordonnées logarithmiques

Figure 3.4 Épaisseur du fluide en fonction du temps sur la plaque inclinée à 20 °

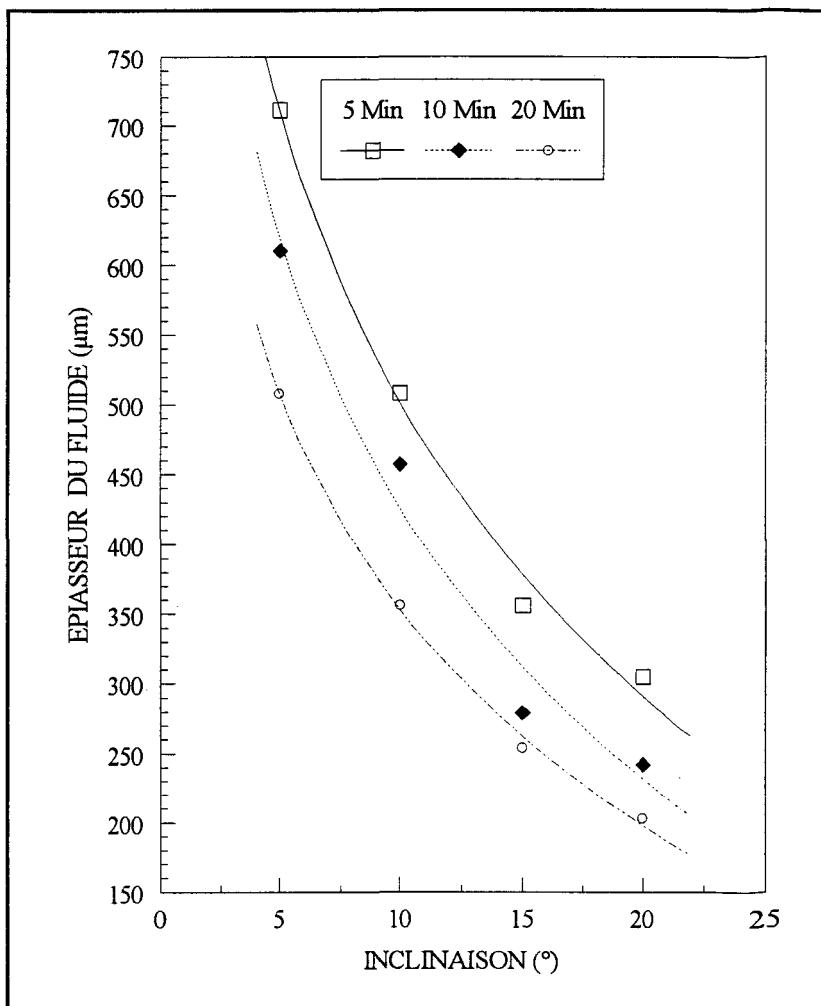


Figure 3.5 Épaisseur du fluide en fonction de l'inclinaison de la plaque à la position 25 mm

En résumé, nous sommes arrivés aux résultats suivants:

1. L'épaisseur du fluide est très sensible à l'inclinaison de la plaque et l'épaisseur du fluide diminue avec l'augmentation de l'inclinaison.
2. Pour les quartes inclinaisons de la plaque et aussi pour les trois positions, l'épaisseur du fluide peut être représentée en fonction du temps par une fonction logarithmique ($h_t = a + b \times \ln(t)$). Les valeurs calculées des constantes a et b apparaissent sur les graphiques en coordonnées logarithmiques.

3.2 Effet de l'intensité de précipitations et de la température

3.2.1 Description des essais

L'influence de l'intensité de précipitations et de la température sur les temps de protection est étudiée pour des intensités de glace comprises entre 0,3 et 20 g/dm²h et cinq valeurs de températures de l'air et des plaques choisies entre -15 °C et - 10 °C . Pour chacune des trente conditions environnementales, deux essais sont effectués, ce qui correspond à soixante essais. Pour chaque essai, trois plaques sont utilisées, ce qui représente donc un ensemble de cent quatre-vingt (180) données. Tous ces essais sont exécutés sur les plaques inclinées à 10° par rapport à l'horizontale et les variations de température de l'air et des plaques ne dépassent pas ± 0,4 °C. Les conditions environnementales simulées dans ces essais sont celles détaillées au tableau 3.2.

Parmi les conditions environnementales simulées dans la chambre climatique, pour les températures de l'air et des plaques à -5,0 °C, il y a deux conditions naturelles qui correspondent aux essais d'endurance servant à la qualification des produits commerciaux. La première condition, de niveau de sévérité léger, correspond à un givre léger de 0,4 g/dm²h, apparenté à la gelée formée dans l'essai standard d'endurance à l'humidité extrême (High Humidity Endurance Test). La seconde est celle d'un brouillard givrant de 5 g/dm²h d'intensité (niveau modéré) qui est la condition utilisée dans l'essai

des conditions retenues naturelles allant d'un niveau très faible ($1,5 \text{ g/dm}^2\text{h}$) à un niveau élevé de précipitations ($24 \text{ g/dm}^2\text{h}$) pour toutes les températures entre -1°C et -15°C .

Tableau 3.2 Paramètres environnementaux des essais

Libellé de l'essai	Durée (min)	β (°)	T_a (°C)	T_p (°C)	Intensité (g/dm ^2h)
97T1I-0.3	80	10	-15,0	-15,0	$1,29 \pm 0,10$
98T1I-0.3	102	10	-15,0	-15,0	$1,05 \pm 0,60$
89T1I-1.4	57	10	-15,0	-15,2	$1,93 \pm 0,26$
90T1I-1.4	62	10	-15,1	-15,1	$2,00 \pm 0,08$
20T1I-2.5	37	10	-14,9	-15,2	$3,47 \pm 0,45$
21T1I-2.5	37	10	-15,0	-15,2	$3,47 \pm 0,15$
22T1I-5	30	10	-15,0	-15,0	$6,00 \pm 0,37$
23T1I-5	30	10	-14,9	-15,2	$5,54 \pm 0,51$
24T1I-10	30	10	-15,0	-15,0	$13,78 \pm 0,96$
25T1I-10	30	10	-15,2	-15,4	$14,33 \pm 0,54$
26T1I-20	30	10	-15,0	-14,9	$23,33 \pm 1,90$
27T1I-20	30	10	-14,9	-14,9	$23,45 \pm 1,86$
99T2I-0.3	125	10	-10,0	-10,0	$0,92 \pm 0,10$
100T2I-0.3	128	10	-10,0	-10,0	$1,02 \pm 0,04$
91T2I-1.4	82	10	-10,0	-10,2	$1,88 \pm 0,21$
92T2I-1.4	87	10	-10,0	-10,1	$1,90 \pm 0,05$
12T2I-2.5	60	10	-10,0	-10,1	$3,38 \pm 0,35$
13T2I-2.5	60	10	-10,0	-10,1	$3,37 \pm 0,21$
14T2I-5	34	10	-10,0	-10,2	$5,89 \pm 0,24$
15T2I-5	37	10	-9,9	-10,1	$5,97 \pm 0,17$
16T2I-10	30	10	-10,0	-10,2	$13,45 \pm 1,00$
17T2I-10	30	10	-10,0	-9,9	$14,35 \pm 0,58$
18T2I-20	30	10	-10,0	-10,0	$20,90 \pm 2,10$
19T2I-20	30	10	-10,0	-10,0	$23,06 \pm 1,12$

Tableau 3.2 Paramètres environnementaux des essais (suite de la page précédente)

Libellé de l'essai	Durée (min)	β (°)	T _a (°C)	T _p (°C)	Int. (g/dm ² h)
6I-0.3	166	10	-5,0	-5,4	0,43 ± 0,06
7I-0.3	177	10	-5,0	-5,2	0,42 ± 0,02
87I-1.4	71	10	-5,0	-5,3	1,54 ± 0,16
88I-1.4	62	10	-5,1	-5,3	1,52 ± 0,05
4I-2.5	61	10	-5,1	-5,1	3,00 ± 0,05
5I-2.5	60	10	-5,1	-5,2	3,04 ± 0,08
1I-5	41	10	-5,0	-5,1	4,98 ± 0,34
2I-5	38	10	-5,0	-5,3	5,69 ± 0,25
8I-10	30	10	-5,0	-5,1	13,50 ± 1,20
9I-10	30	10	-5,0	-4,9	14,40 ± 0,39
10I-20	30	10	-5,0	-5,0	23,89 ± 2,50
11I-20	30	10	-5,0	-4,9	23,63 ± 0,98
111T4I-0.3	137	10	-1,0	-1,2	0,70 ± 0,08
112T4I-0.3	157	10	-1,0	-1,1	0,78 ± 0,04
109T4I-1.4	87	10	-1,0	-1,2	1,74 ± 0,19
110T4I-1.4	96	10	-1,0	-1,3	1,74 ± 0,07
107T4I-2.5	58	10	-1,0	-1,2	3,20 ± 0,42
108T4I-2.5	60	10	-1,0	-1,2	3,09 ± 0,27
105T4I-5,0	58	10	-1,0	-1,4	4,66 ± 0,37
106T4I-5,0	41	10	-1,0	-1,2	5,89 ± 0,20
103T4I-10	35	10	-1,0	-1,2	13,47 ± 0,97
104T4I-10	31	10	-1,1	-1,3	14,68 ± 0,64
101T4I-20	32	10	-1,0	-1,3	21,94 ± 2,05
102T4I-20	31	10	-1,0	-1,4	20,28 ± 2,18

 β : Inclinaison de la plaque T_a: Température de l'airT_p: Température de la plaque

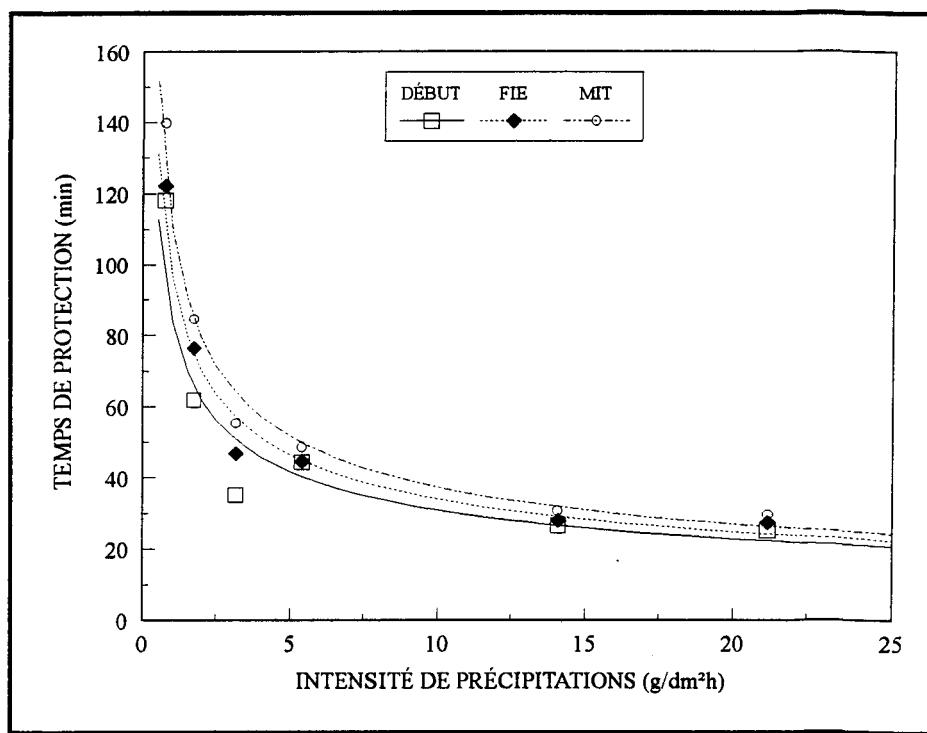
3.2.2 Effet de l'intensité

Les temps de protection mesurés à cinq différentes températures sont présentés aux figures 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 en fonction de l'intensité de précipitations. Chaque valeur donnée de la figure représente la valeur moyenne de deux essais (soit la moyenne de six résultats). Toutes les données sont listées à l'annexe A.

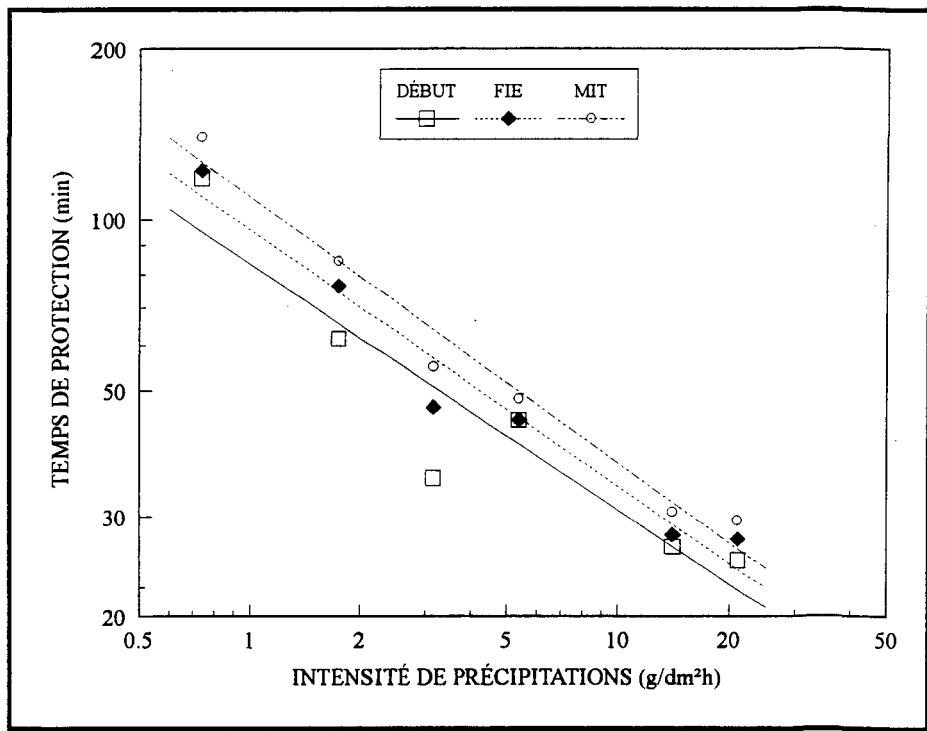
Les courbes montrées aux figures 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 font ressortir les principales observations suivantes:

1. Les temps de protection mesurés sont très sensibles à l'intensité de précipitations, le front de glace apparaissant et progressant plus vite à mesure qu'augmente l'intensité de précipitations.
2. Les temps de protection du fluide ne sont pas une fonction linéaire de l'intensité de précipitations (figures 3.6a, 3.7a, 3.8a, 3.9a, 3.10a). De façon à pouvoir mieux identifier la nature de la dépendance, les résultats sont représentés sur un tracé log-log présenté aux figures 3.6b, 3.7b, 3.8b, 3.9b, 3.10b. La linéarité des courbes en représentation log - log suggère la loi de puissance $t = t_0 \cdot \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)^{-n}$ où I_{ref} correspond à l'intensité de 5 g/dm²h utilisé pour normaliser. Les valeurs de t_0 et n , caractéristiques de chaque température sont données au tableau 3.3. Le facteur R^2 , indiquant le niveau de corrélation est généralement de l'ordre de 99 %, ce qui démontre la bonne représentation par

la loi de puissance. Ces paramètres, t_0 et n , dépendent de la température et cette dépendance sera analysée à la section suivante.

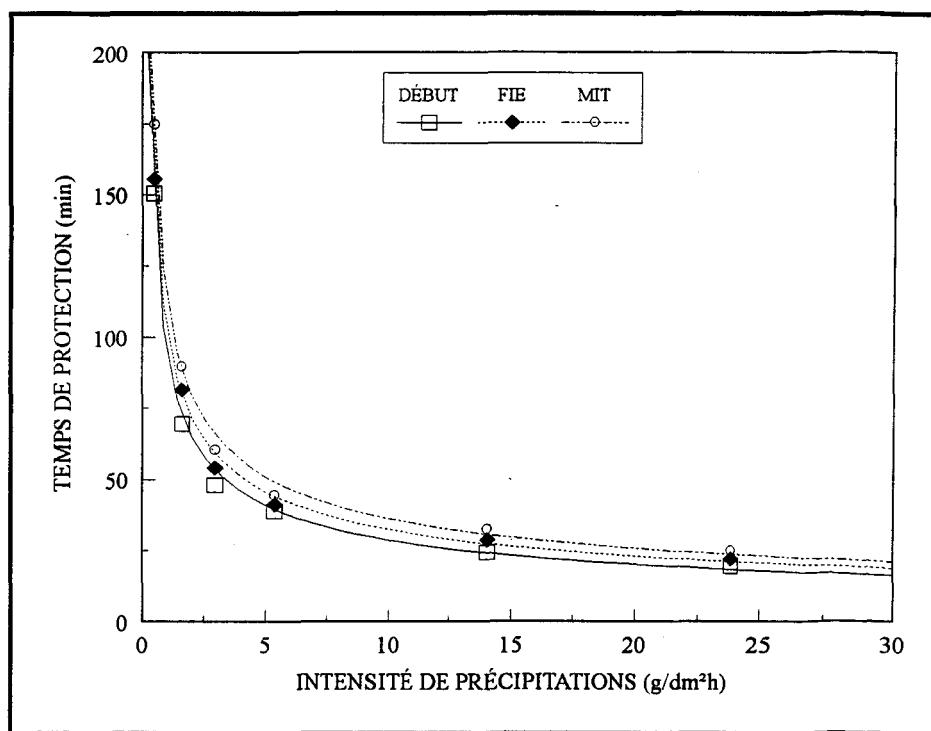


(a) Dans les coordonnées linéaires

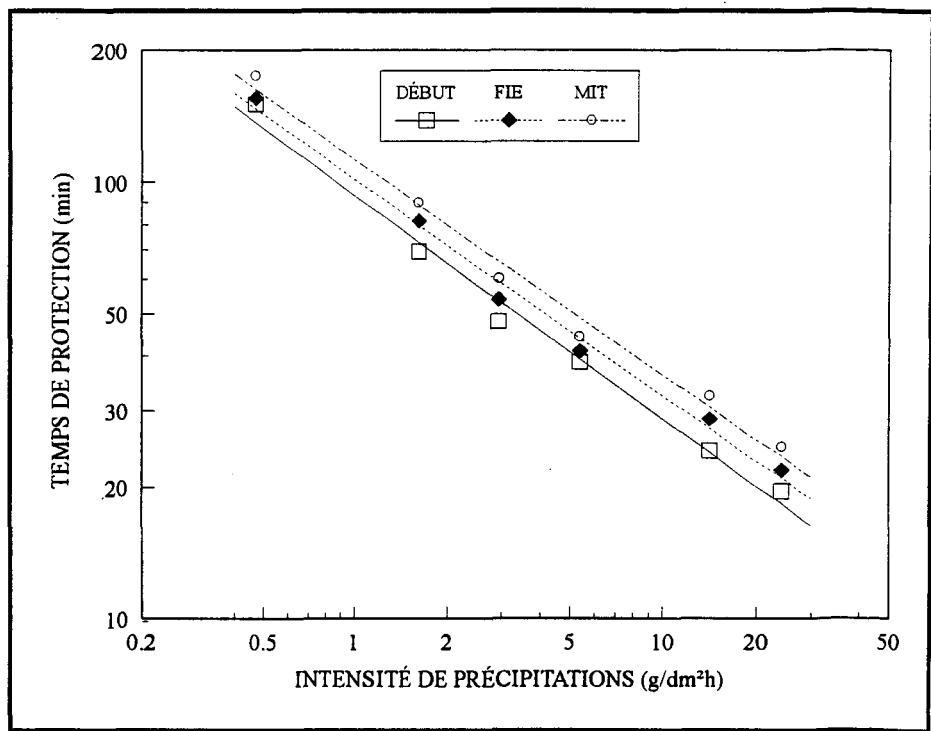


(b) Dans les coordonnées logarithmiques

Figure 3.6 Influence de l'intensité de précipitations sur le temps de protection à -1 °C

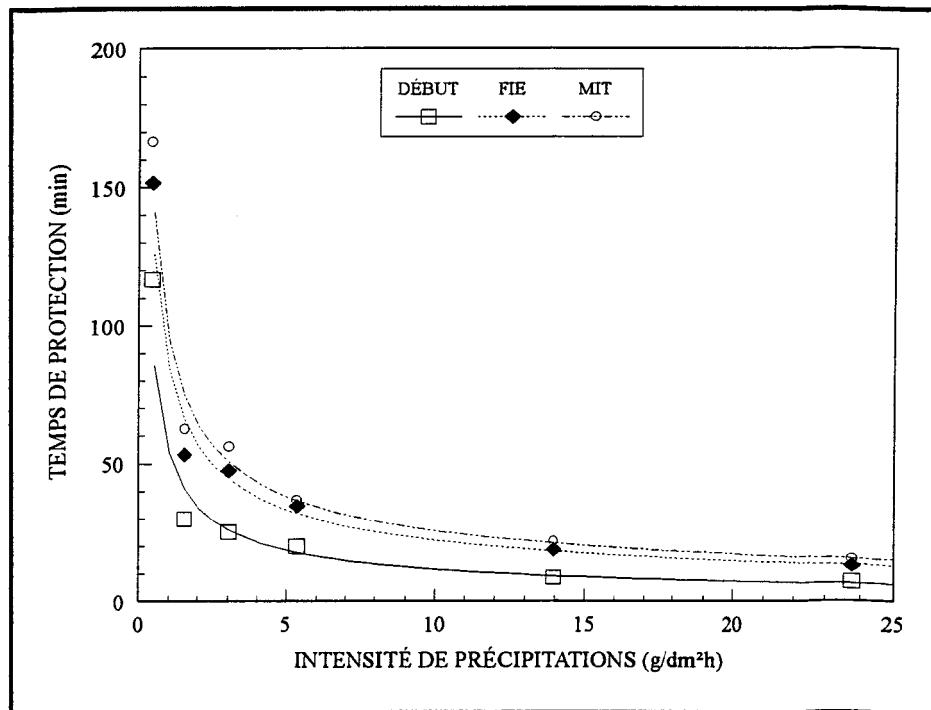


(a) Dans les coordonnées linéaires

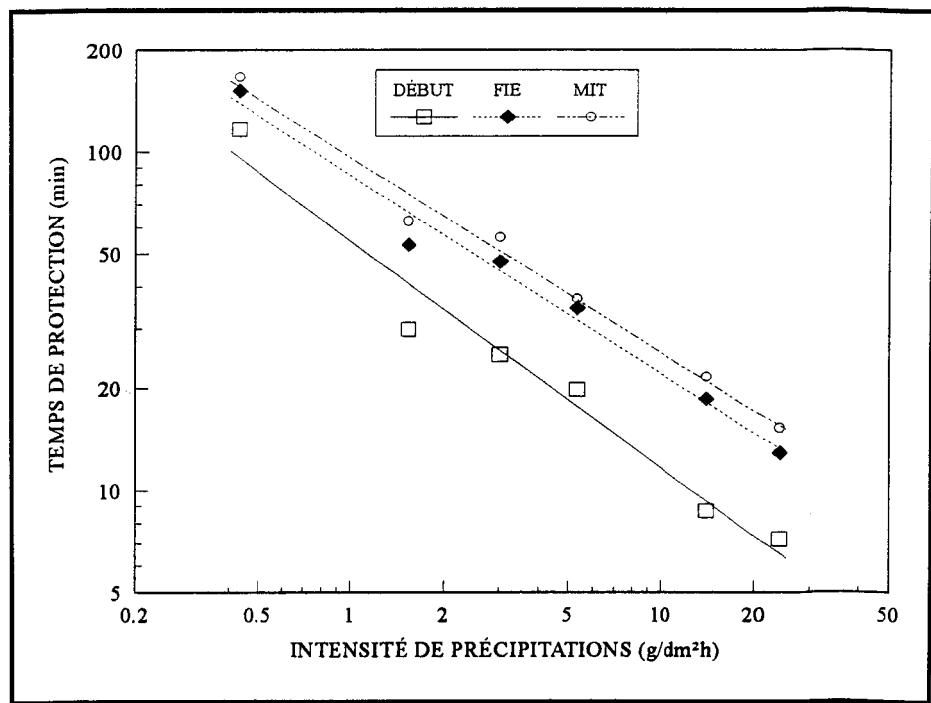


(b) Dans les coordonnées logarithmiques

Figure 3.7 Influence de l'intensité de précipitations sur le temps de protection à -2 °C

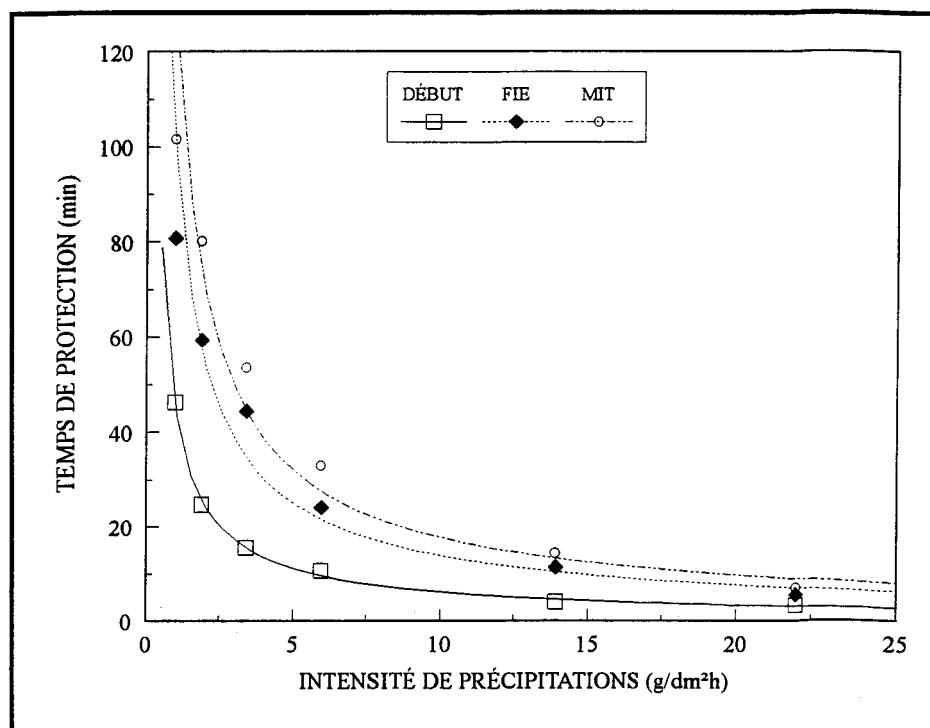


(a) Dans les coordonnées linéaires

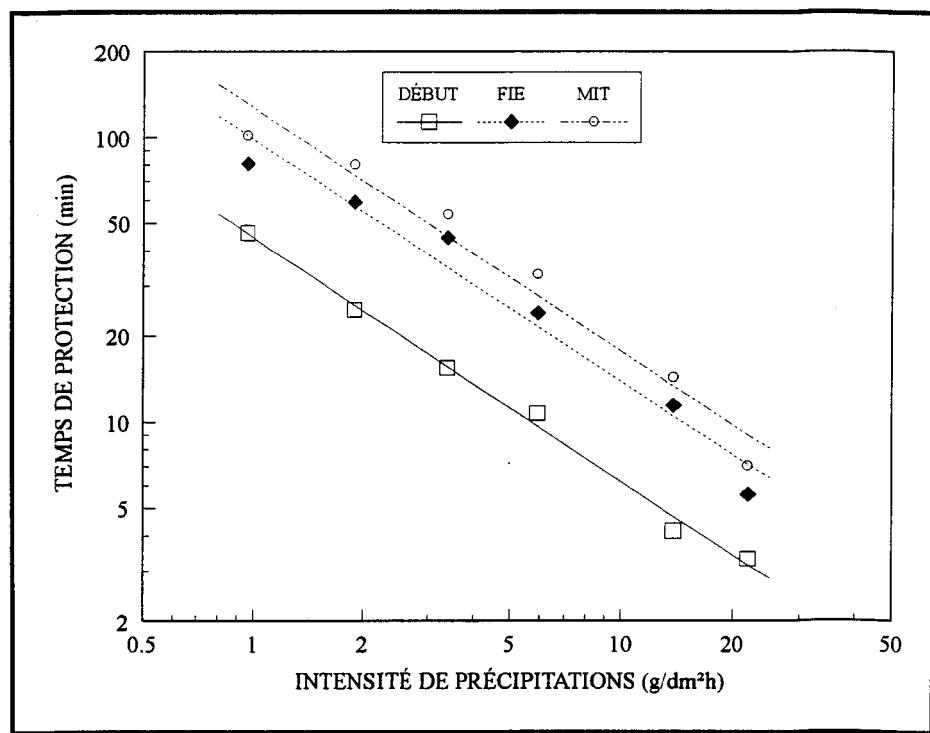


(b) Dans les coordonnées logarithmiques

Figure 3.8 Influence de l'intensité de précipitations sur le temps de protection à -5 °C

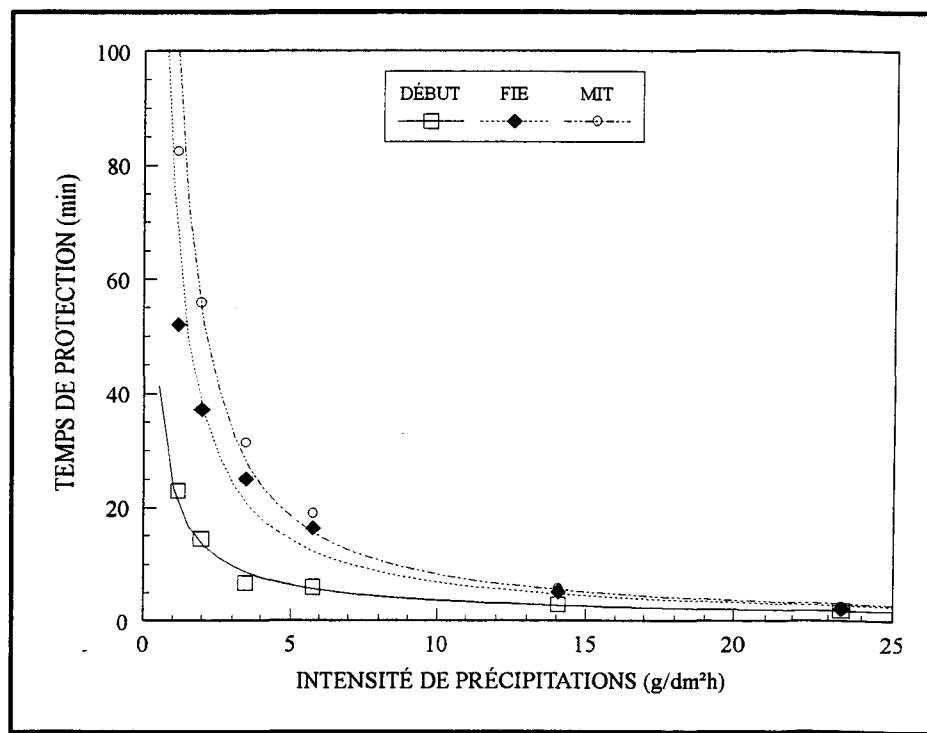


(a) Dans les coordonnées linéaires

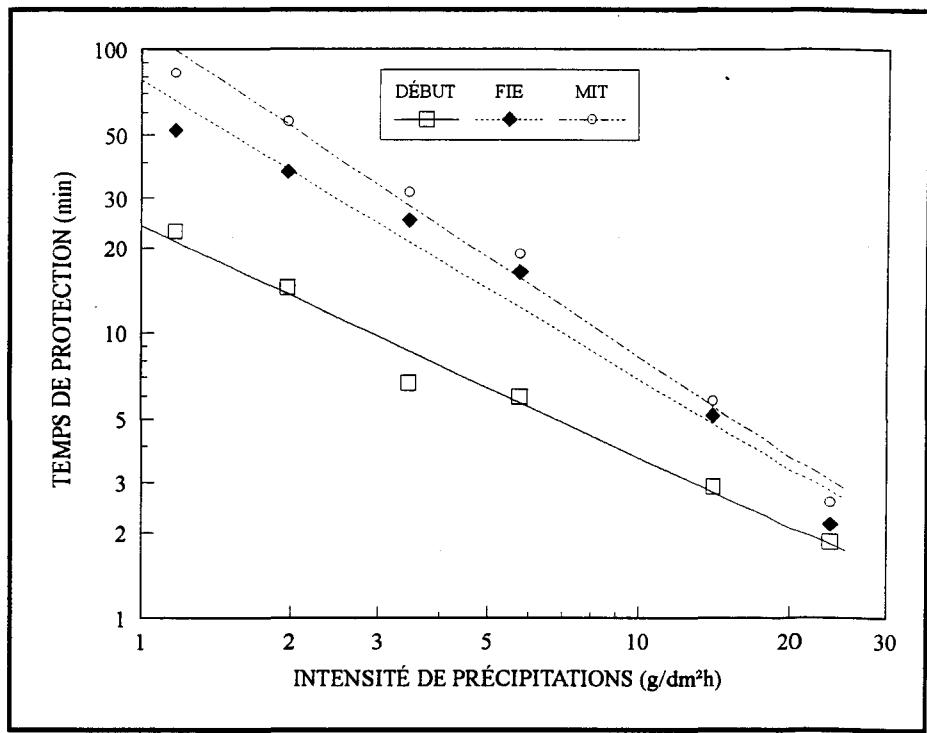


(b) Dans les coordonnées logarithmiques

Figure 3.9 Influence de l'intensité de précipitations sur le temps de protection à -10 °C



(a) Dans les coordonnées linéaires



(b) Dans les coordonnées logarithmiques

Figure 3.10 Influence de l'intensité de précipitations sur le temps de protection à -15 °C

Tableau 3.3 Paramètres t_0 , n et R^2 de la loi de puissance

T (°C)	DÉBUT			FIE			MIT		
	t_0	n	R^2	t_0	n	R^2	t_0	n	R^2
-1	41,80	0,43	0,88	46,49	0,45	0,96	52,30	0,46	0,97
-2	40,96	0,51	0,99	46,00	0,49	0,99	51,04	0,49	0,99
-5	18,56	0,67	0,97	33,45	0,58	0,98	38,28	0,57	0,99
-10	11,28	0,85	0,99	25,01	0,85	0,96	32,28	0,85	0,96
-15	6,49	0,81	0,98	14,38	1,05	0,97	18,50	1,16	0,99

3.2.3 Effet de la température

L'influence de la température sur le temps de protection a été étudié pour cinq températures de l'air et des plaques, comprises entre -15 °C et -1 °C. L'ensemble des temps de protection mesurés est compilé à l'annexe A. Les valeurs des constantes t_0 et n, caractéristiques de chaque température, en accord avec la loi de puissance $t = t_0 \cdot \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)^{-n}$ sont montrées au tableau 3.3 précédent.

La figure 3.11 montre que les temps de protection ne sont pas une fonction linéaire de la température mais qu'ils sont très sensibles à la température de l'air et de la plaque, et puis particulièrement à la température de la plaque. Les données présentées à la figure 3.12, ainsi que la courbe linéaire

en représentation log-log montrent bien que les temps de protection peuvent être représentés, compte tenu des erreurs expérimentales (température $\pm 0,5$ °C, intensité $\pm 5\%$), par une loi exponentielle de la forme $t_0 = t_{ref} \cdot e^{\frac{(T-T_{ref})}{\Delta T_t}}$ où t_{ref} représente le temps de protection à $I_{ref} = 5$ g/dm²h et $T = T_{ref} = -5$ °C. Les valeurs de t_{ref} et ΔT_t sont données dans le tableau 3.4 avec le facteur R^2 . Le facteur R^2 , indiquant le niveau de corrélation, est généralement de l'ordre de 99 %, ce qui démontre la bonne représentation par la loi exponentielle.

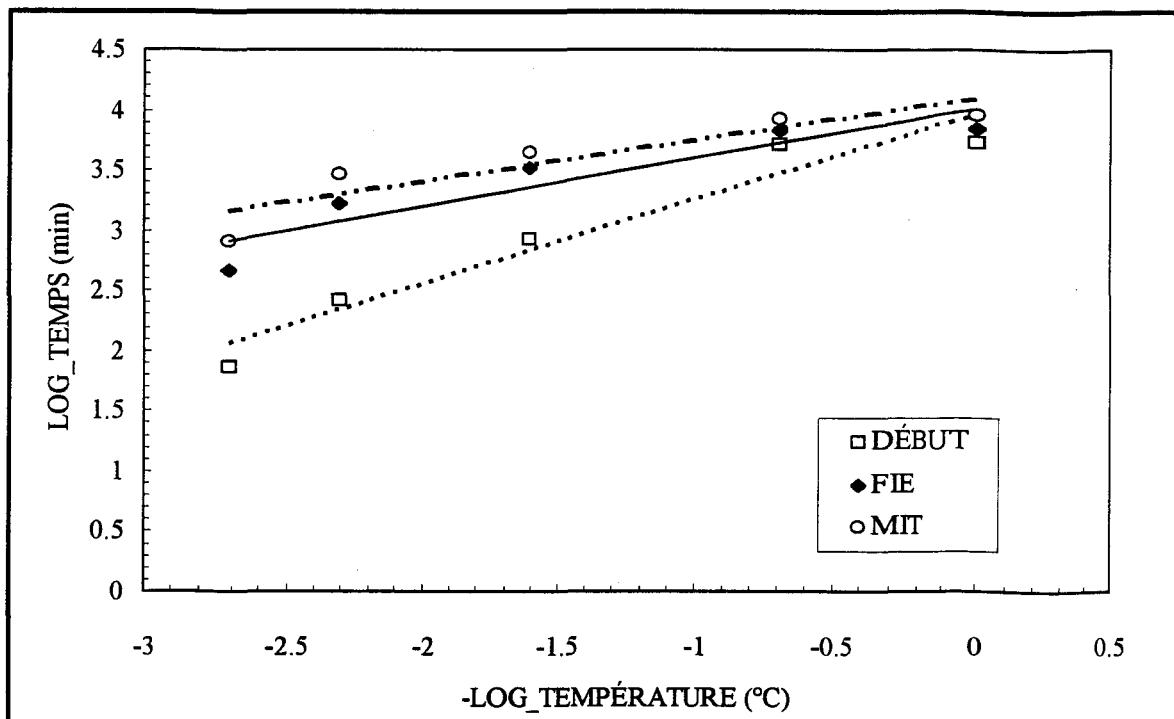


Figure 3.11 Influence de la température sur le temps de protection à l'intensité de 5 g/dm²h

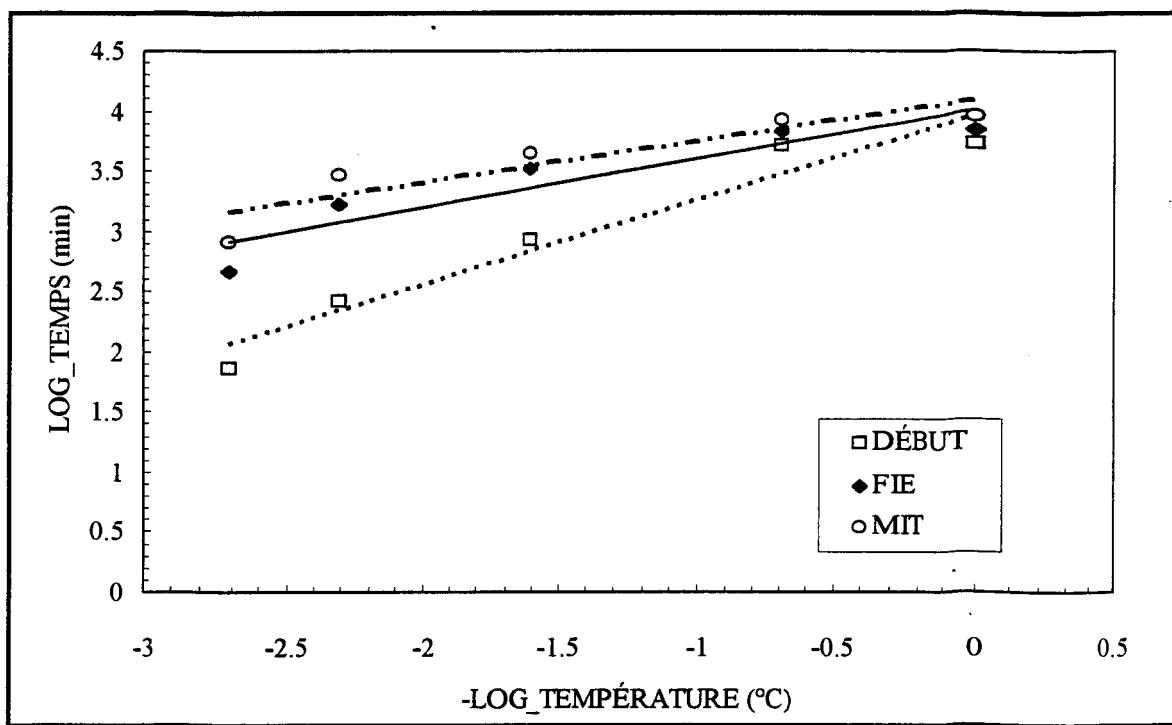


Figure 3.12 Influence de la température sur le temps de protection à l'intensité de 5 g/dm²h en représentation log-log

Tableau 3.4 Paramètres t_{ref} , ΔT_t et R^2 de la loi exponentielle

	DÉBUT	FIE	MIT
t_{ref}	93,06	78,60	81,83
ΔT_t	7,14	12,50	14,29
R^2	0,97	0,99	0,96

Le paramètre n caractéristique de la température, donné au tableau 3.3 précédent, peut être représenté par une loi linéaire de la forme

$n = n_{ref} + \frac{(T - T_{ref})}{\Delta T_n}$ en fonction de la température. La figure 3.13 montre le paramètre n en fonction de la température à l'intensité de $5 \text{ g/dm}^2\text{h}$. Les valeurs de n_{ref} et ΔT_n sont données au tableau 3.5 avec le facteur R^2 indiquant le niveau de corrélation.

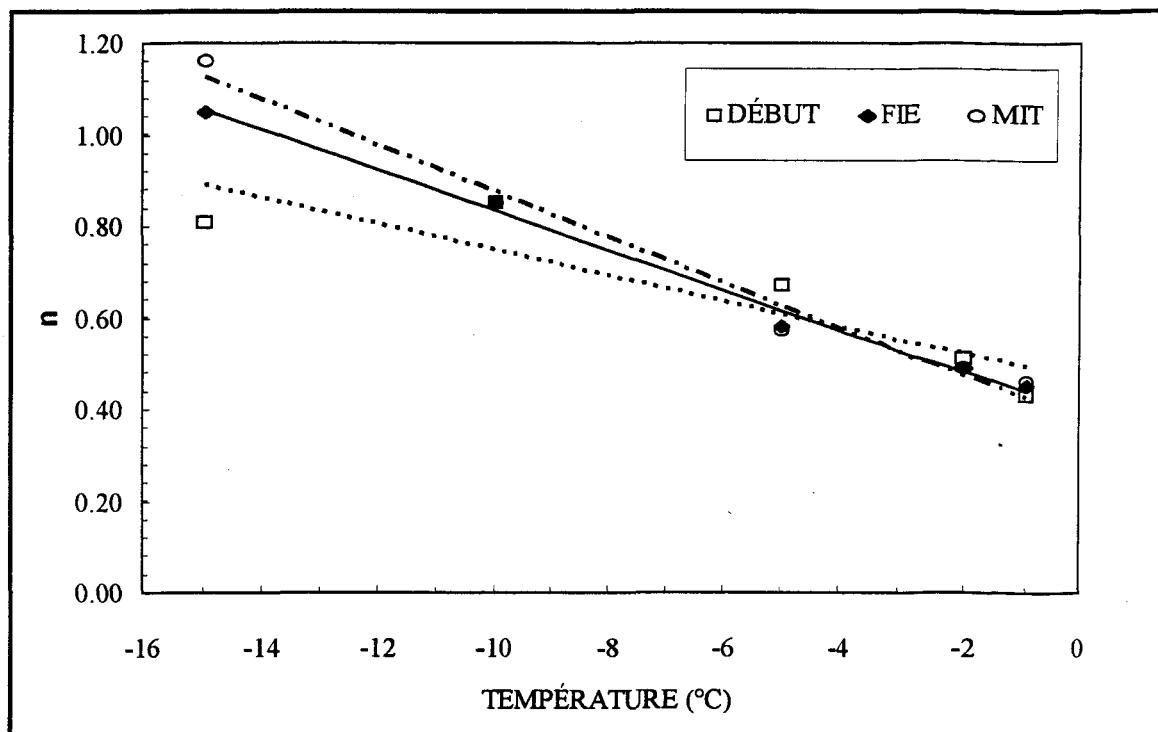


Figure 3.13 Paramètre n en fonction de la température à l'intensité de 5 g/dm^2

Tableau 3.5 Paramètres n_{ref} , ΔT_n et R^2 de la loi linéaire

	DÉBUT	FIE	MIT
n_{ref}	0,61	0,64	0,63
ΔT_n	-0,03	-0,04	-0,05
R^2	0,81	0,99	0,98

Après avoir analysé l'influence de l'intensité de précipitations et de la température sur les temps de protection, ceux-ci peuvent être représentés par l'équation suivante:

$$\frac{t}{t_{ref}} = e^{\frac{(T-T_{ref})}{\Delta T_t}} \cdot \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)^{-n_{ref}} \cdot \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)^{\frac{-(T-T_{ref})}{\Delta T_n}} \quad (3.1)$$

Le premier terme dans cette équation représente l'influence de la température, le deuxième représente l'influence de l'intensité de précipitations et le dernier peut être considéré comme l'influence de l'interaction de ces deux facteurs sur les temps de protection. Le temps du FIE peut être calculé à l'intensité I ($\text{g}/\text{dm}^2\text{h}$) et à la température T ($^{\circ}\text{C}$) par la formule suivante :

$$t_{FIE} = 78,60 \cdot e^{\frac{(T+5)}{12,50}} \cdot \left(\frac{I}{5} \right)^{-0,64} \cdot \left(\frac{I}{5} \right)^{\frac{(T+5)}{0,04}} \quad (3.2)$$

3.3 Effet de l'inclinaison de la plaque

3.3.1 Mode opératoire

Les essais précédents ont été réalisés avec une plaque inclinée de 10°. C'est l'angle normalisé utilisé pour simuler l'inclinaison de l'aile d'un avion, en accord avec les procédures normalisées AMS et ISO. Toutefois une étude plus réaliste, nécessite de connaître l'influence de l'inclinaison pour les valeurs d'angles compris entre 0 et 20 degrés. Dans ce travail, nous présentons les résultats des essais faits dans la chambre climatique avec cinq différentes inclinaisons (2,5, 5, 10, 15 et 20 °) où les températures de l'air et des plaques sont contrôlées à $-5,0 \pm 0,5$ °C et l'intensité de précipitations à $6,0 \pm 0,5$ g/dm²h environ. Les paramètres environnementaux mesurés sont détaillés au tableau 3.6 où chaque donnée correspond à la moyenne de trois mesures. Chaque mesure est donnée à l'annexe B.

Tableau 3.6 Paramètres environnementaux: effet de l'inclinaison

Libellé de l'essai	Durée (min)	β (°)	Ta (°C)	Tp (°C)	Intensité (g/dm ² h)
38B-2,5	184	2,5	-4,8	-5,1	$6,32 \pm 0,43$
39B-2,5	174	2,5	-4,8	-5,1	$6,37 \pm 0,17$
40B-5	88	5	-5,0	-5,3	$6,67 \pm 0,32$
41B-5	96	5	-5,0	-5,2	$6,28 \pm 0,12$
1I-5(B-10)	41	10	-5,0	-5,1	$4,98 \pm 0,34$
2I-5(B-10)	38	10	-5,0	-5,3	$5,69 \pm 0,25$
42B-15	33	15	-5,0	-5,4	$5,65 \pm 0,36$
43B-15	32	15	-5,0	-5,4	$5,65 \pm 0,41$
44B-20	30	20	-4,9	-5,1	$5,84 \pm 0,66$
45B-20	30	20	-4,9	-5,2	$6,35 \pm 0,45$

3.3.2 Observations

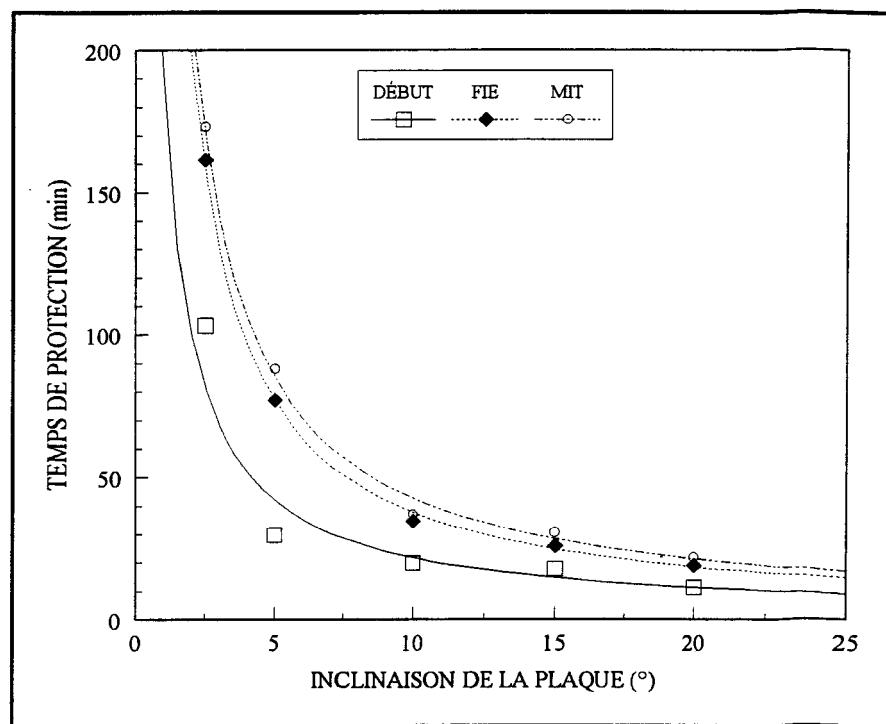
Les temps de protection mesurés (DÉBUT, FIE et MIT) aux différentes inclinaisons sont mis sous forme graphique à la figure 3.14.

En résumé, nous sommes arrivés aux résultats suivants:

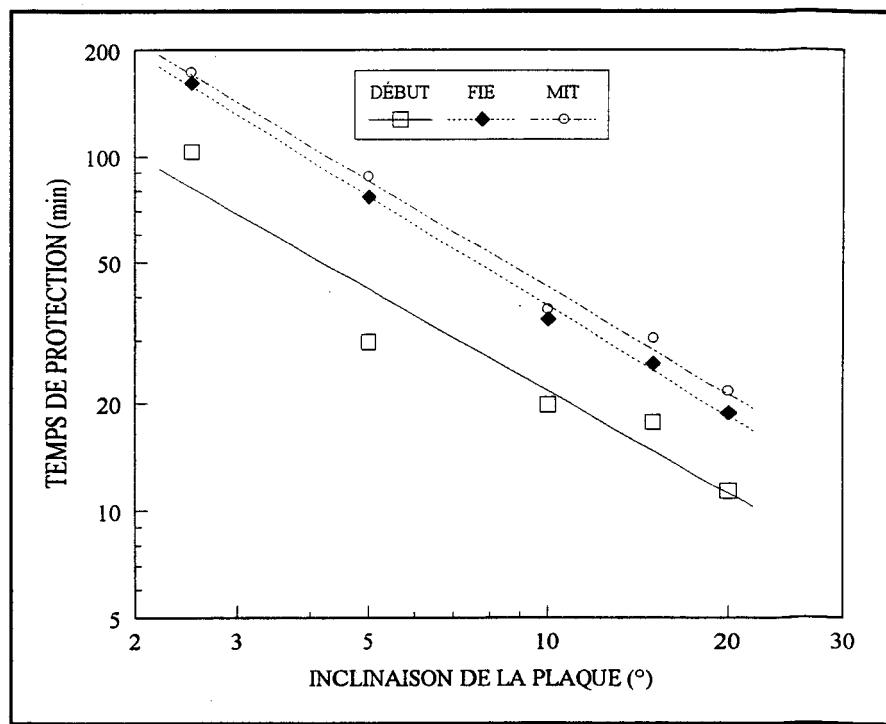
1. Les temps de protection sont très sensibles à l'inclinaison. La progression d'un front de glace augmente avec l'inclinaison de la plaque du fait que l'épaisseur du fluide diminue lorsque l'inclinaison augmente. Ainsi, par exemple, les temps de protection atteignant 160 minutes à $2,5^\circ$ diminuent à 20 minutes à un angle de 20° . Les temps de protection sont donc variables selon l'inclinaison de la surface exposée. Il n'y a pas seulement que ce facteur à considérer, en effet, il y a l'écoulement du fluide qui va varier selon sa position sur l'aile.
2. Avec la plaque plane, les temps de protection ne sont pas une fonction linéaire de l'inclinaison. De façon à pouvoir mieux identifier la nature de la dépendance, les résultats sont retracés sur un tracé log-log. Les données, présentées à la figure 3.14b, peuvent être représentées par une loi de puissance $t = t_{ref} \cdot \left(\frac{\beta}{\beta_{ref}} \right)^{-n}$ où t_{ref} est le temps de protection pour l'inclinaison de référence $\beta_{ref} = 10^\circ$. Les valeurs de t_{ref} et n sont présentées au tableau 3.7.

Tableau 3.7 Paramètres t_{ref} , n et R^2 de la loi de puissance

	DÉBUT	FIE	MIT
t_{ref}	21,97	37,86	42,58
n	0,95	1,03	1,00
R^2	0,92	1,00	0,99



(a) Dans les coordonnées linéaires



(b) Dans les coordonnées logarithmiques

Figure 3.14 Influence de l'inclinaison sur le temps de protection

3.4 Effet de la courbure

3.4.1 Mode opératoire

Dans les essais normalisés, la plaque présente en tête une arête qui fait pratiquement un angle droit auquel on peut faire correspondre un rayon de courbure très petit, inférieur à 0,01 cm. Afin de voir l'effet d'un rayon de courbure plus grand, on a modifié quelques plaques de façon à ce qu'elles présentent en tête des rayons de courbure respectifs de 5,4 et de 8,4 centimètres tel que montrés à la figure 3.15. Six essais, à deux différents niveaux de précipitations, sont effectués avec ces plaques. L'inclinaison des plaques est maintenue à 10 degrés et les températures à $-5,0 \pm 0,5$ °C. Les paramètres environnementaux sont résumés au tableau 3.8.

Tableau 3.8 Paramètres environnementaux: effet du rayon de courbure en tête

Libellé de l'essai	Durée (min)	β (°)	R (cm)	Ta (°C)	Tp (°C)	Intensité. (g/dm ² h)
2I-5	38	10	0,01	-5,0	-5,3	5,69 ± 0,25
46I2R-1	36	10	8,4	-4,8	-5,1	5,33 ± 0,06
121I2R-2	34	10	5,4	-4,9	-5,1	5,55 ± 0,13
11I-20	30	10	0,01	-5,0	-4,9	23,63 ± 0,98
120I4R-1	30	10	8,4	-5,0	-5,4	19,75 ± 0,44
49I4R-2	30	10	5,4	-5,0	-5,2	19,83 ± 0,71

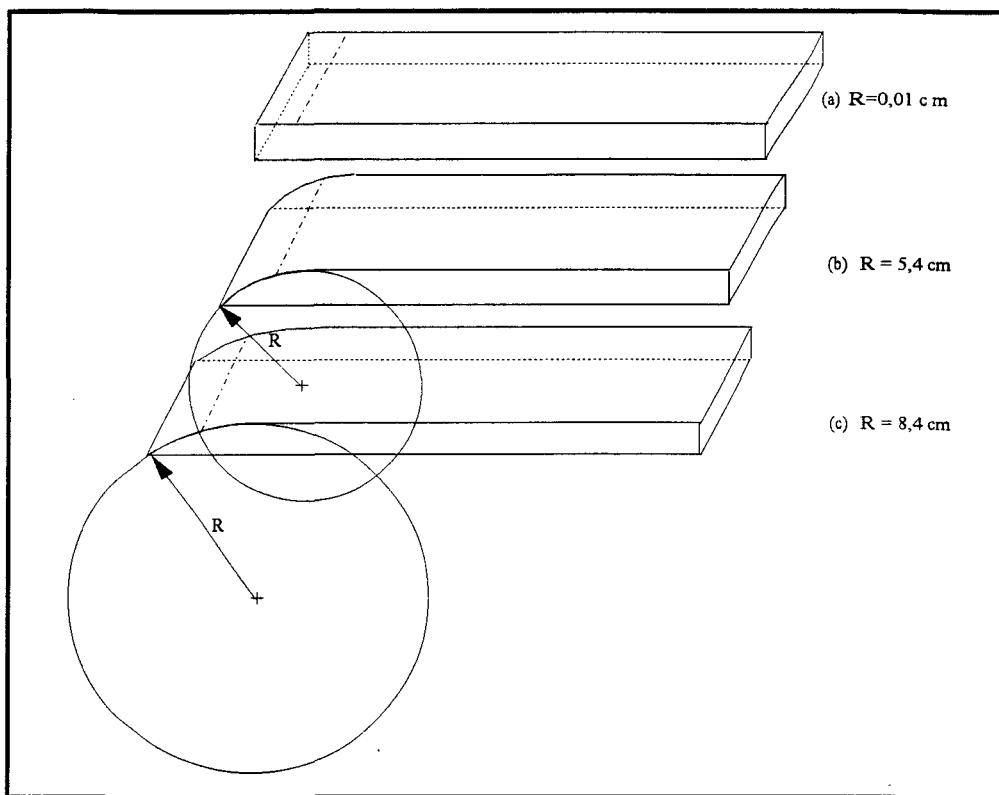


Figure 3.15 Courbures des plaques modifiées en tête

3.4.2 Résultats expérimentaux

Les résultats de l'effet de la courbure sur les temps de protection de l'antigivre sont compilés en annexe C; ils sont mis sous forme graphique aux figures 3.16 et 3.17. Les figures 3.16 et 3.17 montrent qu'il y n'a pas de relation particulière entre la courbure et le temps de protection. On ne peut pas affirmer ici, compte tenu des erreurs de mesures sur les temps de protection et les intensités de givrage, que le faible changement du temps de protection provient de l'effet de la courbure ou de celui de l'intensité de précipitations ou de la

combinaison de ces deux facteurs. Il faut répéter les essais, et en même temps contrôler l'intensité de précipitations plus précisément.

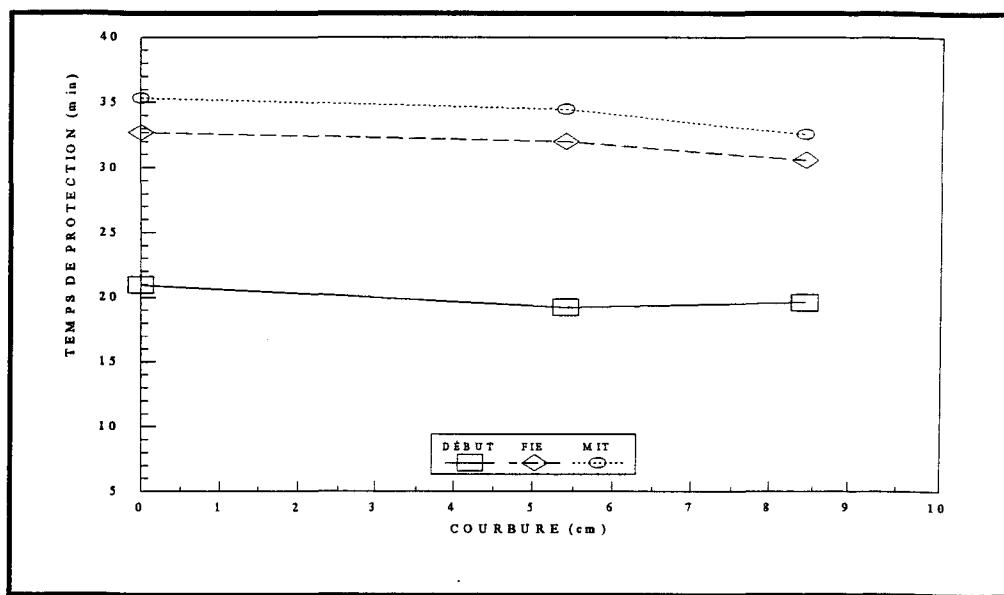


Figure 3.16 Influence de la courbure à l'intensité moyenne de $5,5 \text{ g/dm}^2\text{h}$

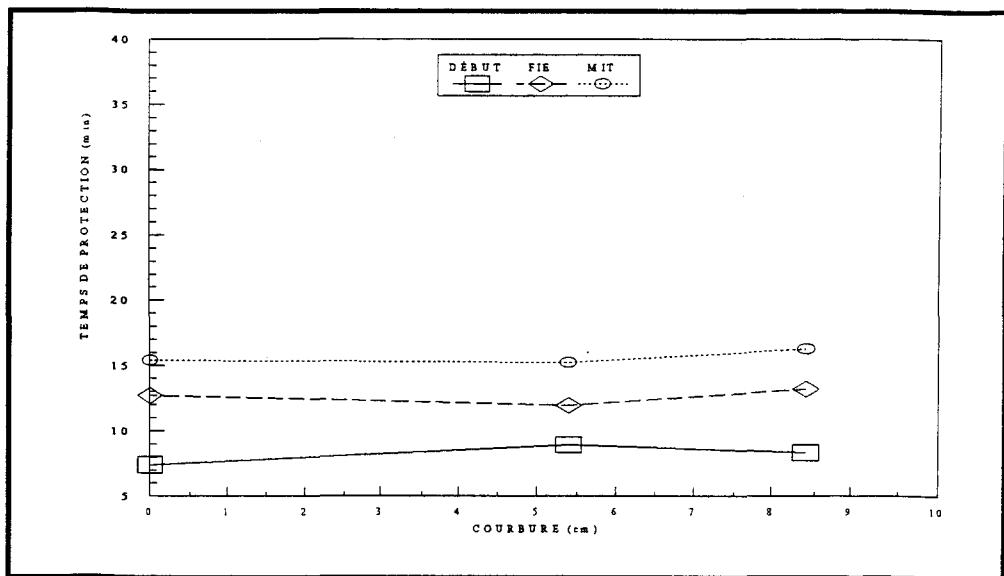


Figure 3.17 Influence de la courbure à l'intensité moyenne de $21,2 \text{ g/dm}^2\text{h}$

CHAPITRE 4

Prédiction du temps de protection

4.1 Introduction

Dans le chapitre 3, on a présenté les résultats d'essais en laboratoire montrant les effets des différents paramètres susceptibles d'affecter les temps de protection d'un fluide antigivre. On se rappellera que les temps de protection d'un produit comme celui utilisé dans ce travail dépendent d'une multitude de facteurs. Les facteurs les plus importants sont: l'intensité de précipitations, les températures de l'air et de la plaque, le contenu en eau des précipitations glacées et l'épaisseur de la pellicule du produit en surface.

Les temps de protection sont aussi influencés par d'autres variables qui n'ont pas toutes été étudiées en laboratoire, comme la réaction exothermique du fluide avec l'eau de précipitations, la radiation solaire, l'humidité relative, la courbure et l'inclinaison de la surface, le vent, etc. On comprend donc que les temps de protection sont difficilement prévisibles si on veut tenir compte de tous les facteurs en jeu. Toutefois, de façon à mieux comprendre les processus

physiques et établir des modèles de base capables de l'évaluation du temps de protection dans différentes conditions climatiques, on peut envisager des cas simples. Tel est le cas des deux modèles proposés ici pour l'évaluation du temps de protection où l'action d'un nombre réduit de paramètres est considérée.

Pour commencer, nous présenterons les caractéristiques générales des fluides FPD. Ensuite nous expliquerons les processus physiques en jeu lors du gel du fluide, ce qui permettra l'établissement de deux modèles simples prédisant les temps de protection. La validation du ou des modèles retenus consiste à comparer les temps de protection calculés aux valeurs mesurées dans le présent travail avec le produit évalué dans différentes conditions expérimentales.

4.2 Caractéristiques du fluide FPD

Tous les fluides FPD connus, disponibles commercialement pour le dégivrage et la protection antigivre des ailes d'avion, contiennent un ou des glycols, soit l'éthylène glycol, le diéthylène glycol ou le propylène glycol qui sont tous complètement solubles dans l'eau. Les fluides FPD employés aujourd'hui sont caractérisés par un diagramme de phase donnant la température de congélation en fonction de la dilution, comme celui représenté à la figure 4.1. Ce diagramme donne la température de formation des premiers

cristaux de glace pour une concentration donnée du mélange eau-glycol. De façon générale, les produits commerciaux de type I à l'état concentré contiennent entre 80 % et 90 % de glycol et ceux de type 2, entre 50 % et 60 %. À ces niveaux de dilution, l'augmentation de la quantité d'eau dans le glycol va généralement contribuer à abaisser le point de congélation du mélange.

Le point de congélation le plus bas est observé avec un mélange contenant entre 60 % et 80 % de glycol (20 % et 40 % d'eau). Tous les glycols purs gèlent à une température supérieure à celle de leurs solutions aqueuses. Pour cette raison, tous les fluides FPD disponibles commercialement pour le dégivrage et la protection antigivre contiennent une certaine quantité d'eau.

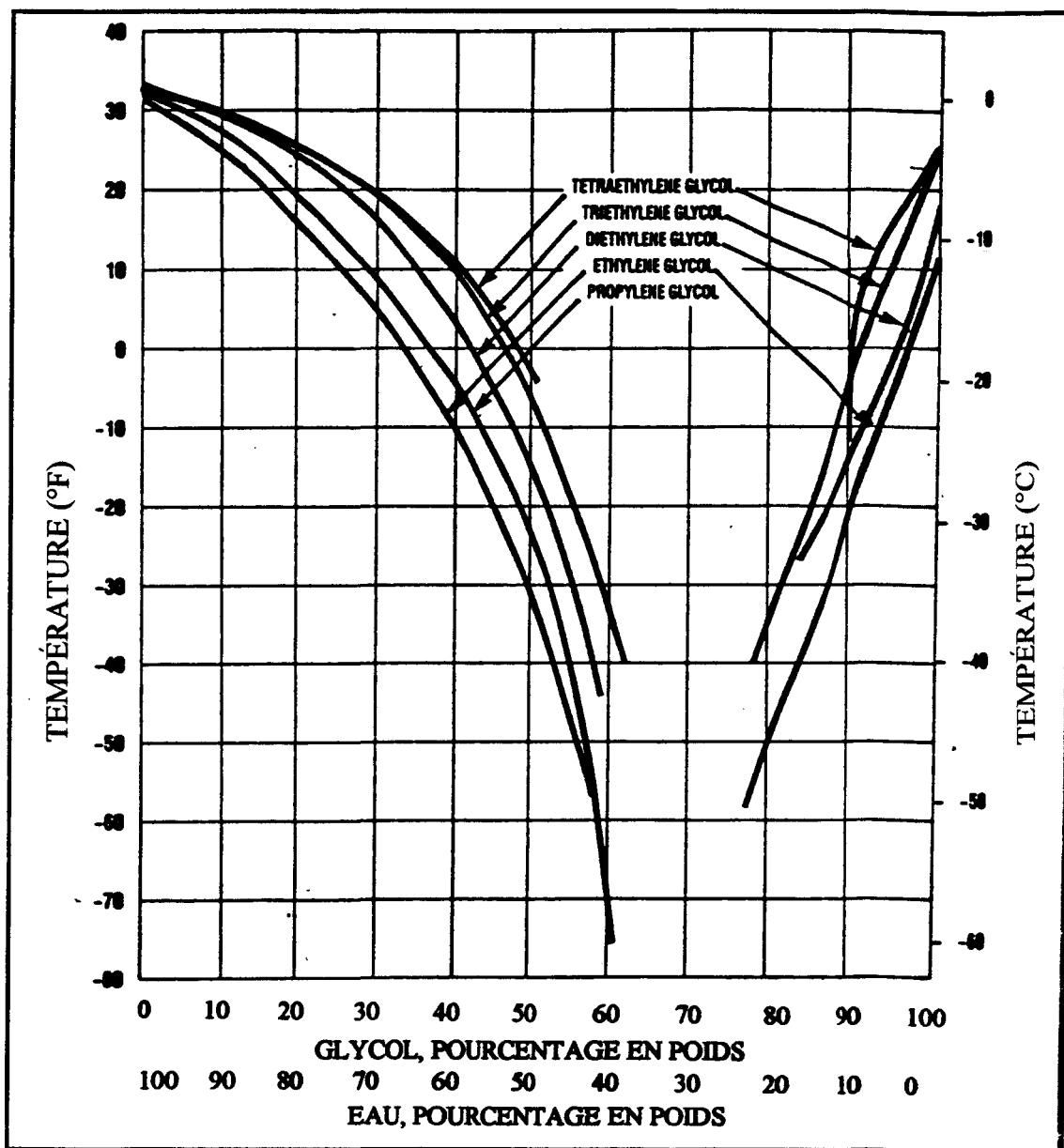


Figure 4.1 Températures de congélation des solutions de glycol et d'eau en fonction du pourcentage de dilution en poids

4.3 Protection antigivre

L'efficacité de la protection antigivre est déterminée à partir de la mesure du temps nécessaire pour obtenir la congélation du produit exposé à un niveau donné de précipitations. Le temps de protection standard mesuré en laboratoire est celui pour lequel il y a congélation du film antigivre sur une longueur de 25 mm. Le temps de protection d'un fluide dépend entre autres de son niveau de dilution. Lorsque les gouttelettes d'eau se mélangent avec le fluide FPD, il y a dilution du produit ce qui élève son point de fusion. Dans l'hypothèse qu'il n'a pas de surfusion dans le film de fluide à la température T_f , la congélation du produit dilué va commencer à se produire quand le niveau de dilution atteindra celui correspondant au point de congélation donné par le diagramme d'équilibre montré à la figure 4.1. En raison de l'inclinaison de la plaque plane, l'épaisseur la plus mince du film de fluide qui s'écoule sous l'effet de la gravité est celle du film en haut de la plaque. Et c'est également en haut de la plaque, que la dilution va être la plus élevée et que la congélation va commencer à se produire (photo. 4.1).

La congélation d'un film de produit antigivre va différer selon que les précipitations font intervenir des gouttelettes surfondues, ou des particules solides de glace et de neige. En effet, les gouttelettes surfondues pénètrent dans le film de fluide pour le diluer. Les particules solides comme la glace et la neige doivent, quant à elles se dissoudre avant de pouvoir diluer le produit. Dans le présent travail, on se limitera seulement au cas des gouttelettes surfondues, soit le type de gouttelettes utilisé dans les essais en laboratoire.

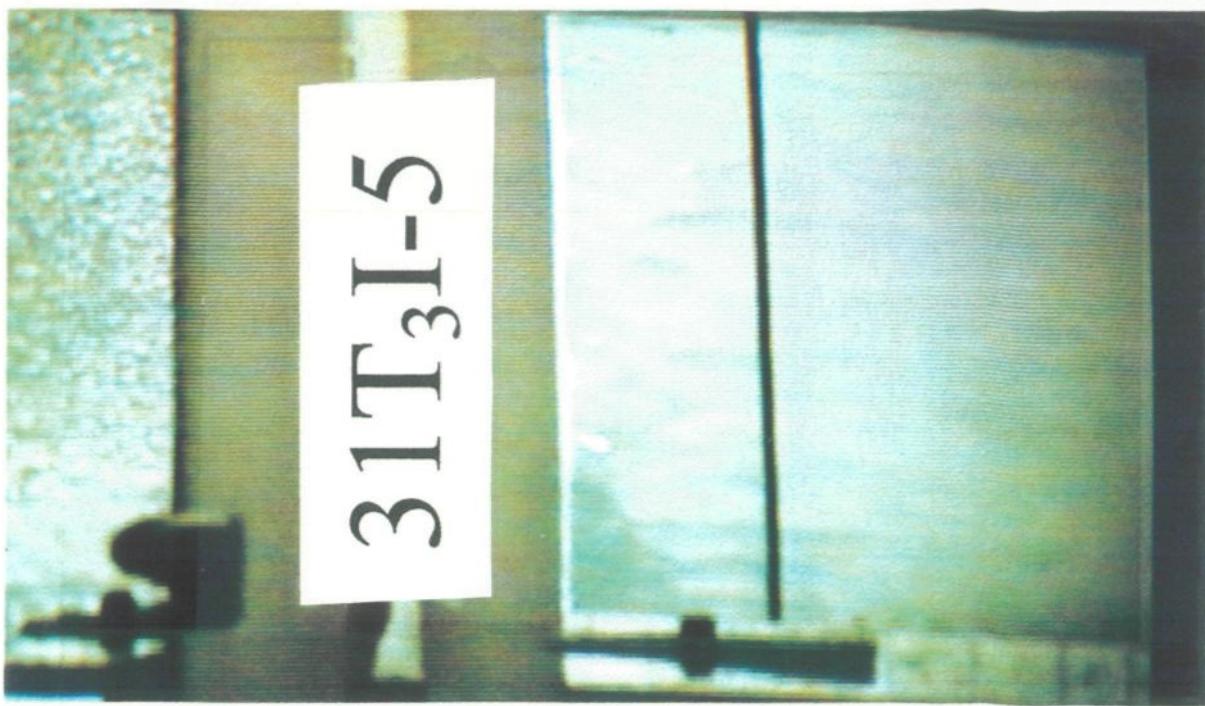


Photo 4.1 Début du front de glace en haut de la plaque

Avec les gouttelettes surfondues, il convient encore de distinguer deux situations: la première, qui est observée à des niveaux de précipitations faibles et modérés($<10 \text{ g/dm}^2\text{h}$), correspond à un front de solidification qui commence au sommet de la plaque, et progresse de façon régulière jusqu'à ce qu'il recouvre entièrement la plaque. La seconde, observée à des taux de précipitations plus élevés($>10 \text{ g/dm}^2\text{h}$), est celle pour laquelle, après un certain temps où la progression est régulière, des plaquettes de glace non rattachées au front principal de glace commencent à se former pour couvrir toute la plaque. Les deux situations sont illustrées aux photos 4.2 et 4.3. La première montre le front de solidification normal qui est uniforme et la seconde, les plaquettes de glace. Ce dernier cas ne sera pas l'objet du modèle développé ci-après.



Photo 4.2 Front de solidification uniforme



Photo 4.3 Front de solidification non-uniforme (plaquettes de glace)

4.4 Modélisation du front de glace

L'objectif de la modélisation est ici de calculer, par un programme de simulation, la dilution et la densité du fluide atteintes par le film de fluide lorsque ce dernier est exposé aux précipitations surfondues. On fait l'hypothèse que c'est la dilution du fluide qui régit la formation et la progression du front de glace en haut de la plaque plane. Deux modèles basés sur l'épaisseur du fluide sont établis; un modèle avec précipitations et un second modèle sans précipitations.

La modélisation de la dilution et de la densité est faite à partir de deux programmes; l'un appelé le modèle 1, est basé sur le lissage des épaisseurs du fluide mesurées sous précipitations; le second appelé modèle 2, est basé sur une loi empirique prédisant l'épaisseur du film de fluide en fonction du temps à un taux de dilution fixé sans précipitations. Le modèle 2 utilise les mêmes équations que celles du premier modèle. Les deux programmes permettent de calculer la densité et la dilution du film de fluide pour n'importe quel temps d'exposition aux précipitations surfondues.

4.4.1 Description générale des deux modèles

La figure 4.2 présente un schéma de la plaque de largeur b et de longueur L recouverte d'un film antigivre avec au sommet de la plaque, un segment de surface A , d'épaisseur h , et de concentration c (% en masse); c représente la fraction en poids de FPD (ici il s'agit du glycol) et $(1-c)$, le contenu en eau. Par la suite, on définira la dilution comme la fraction massique de l'eau soit $D = 1-c$. La concentration en glycol du produit, utilisée dans ce travail tel que reçu, est de 54 %, ce qui correspond à une dilution ou un contenu en eau de 46 %. Le modèle calcule la dilution de la partie du film de fluide de largeur b couvrant une longueur de 25 mm en haut de la plaque. La dilution de cette dernière résulte d'une part de l'eau ajoutée par les précipitations, et d'autre part du fluide et de l'eau perdue par l'écoulement dû à la gravité. On fait l'hypothèse que le film de fluide en tête de la plaque se congèle lorsque le mélange atteint un niveau de dilution critique $(1-c_1)$, correspondant à la température T_f du film de fluide. A titre d'exemple, si la température du fluide est de -5 °C, on considère que la congélation se produira au niveau de dilution du fluide correspondant à la valeur de température de -5 °C, soit la valeur de 81 % dans le cas d'éthylène glycol pur.

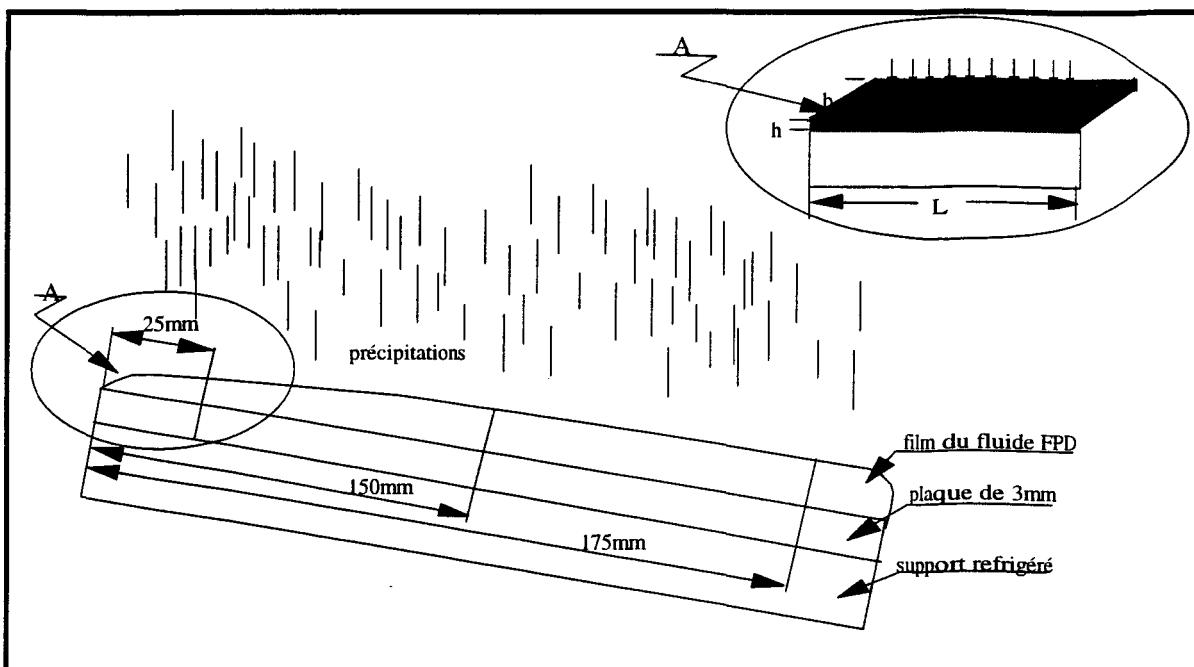


Figure 4.2 Schéma de la plaque recouverte d'une pellicule de fluide FPD

On fait également les hypothèses suivantes: il n'y a pas de surfusion, et le mélange est homogène. Si l'intensité de précipitations est connue, le temps pour que le segment de surface A atteigne le niveau de dilution critique($1-c_1$), peut être calculé à partir des valeurs initiales des paramètres mesurés cinq minutes après l'application sur la plaque inclinée du fluide: l'épaisseur h_0 , la densité ρ_f , la concentration c_0 , et la température T_f . Connaissant la température du fluide T_f sur la plaque et compte tenu du type de glycol, on peut trouver la concentration critique c_1 pour laquelle la première cristallisation se produit en se basant sur le graphique de la figure 4.1.

Sous l'effet des précipitations, l'eau pénètre dans cet élément volumique de fluide. Dans le même intervalle de temps, il y a écoulement du

fluide. En connaissant le changement d'épaisseur $h(t)$ par une relation empirique, on peut calculer la densité du fluide $\rho_f(t)$ et la dilution massique en eau $D(t)$. Les données et les relations de base utilisées pour représenter numériquement la dilution et la densité du fluide au temps initial $t = t_0$, sont h_0 , ρ_f , D_0 , et à l'instant $t_n = t_0 + n \cdot \Delta t$, h_n , ρ_{fn} , D_n .

Les relations de base sont données ci-après:

$$m_f = \rho_f \cdot v_f \quad (4.1)$$

$$D = \frac{m_e}{m_f} \quad (4.2)$$

$$v_f = A \cdot h \quad (4.3)$$

4.4.2 Algorithmes de calcul de la dilution et de la densité

Les équations à la base des deux algorithmes sont dérivées des lois de la conservation de la masse et du volume pendant un incrément de temps Δt . Pendant Δt , on a les échanges illustrés à la figure 4.3.

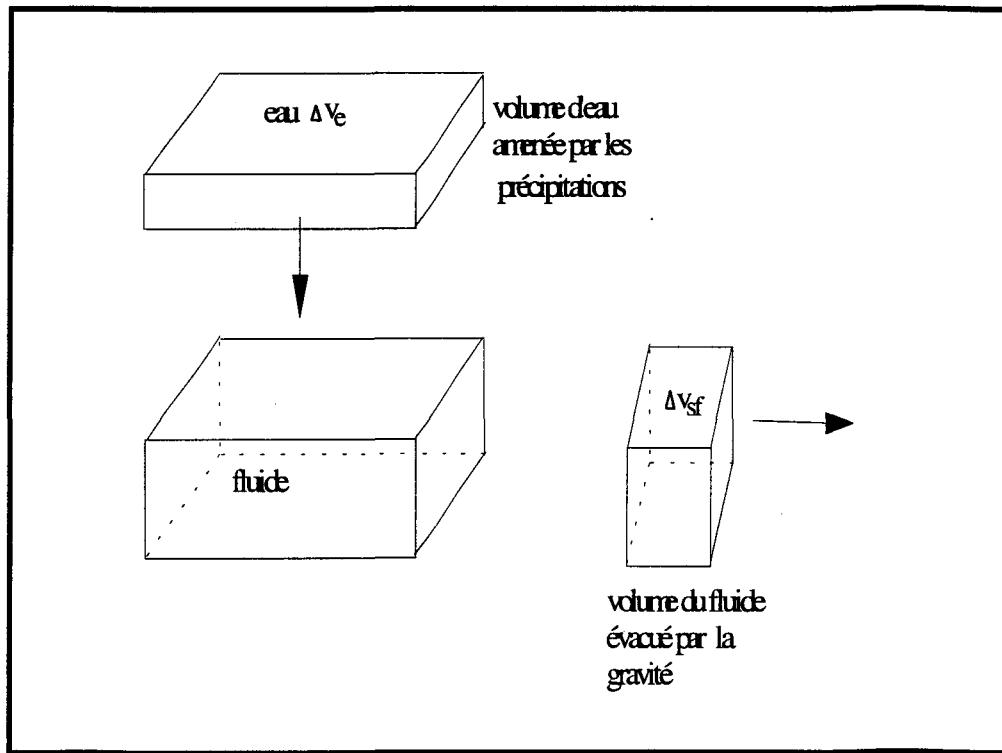


Figure 4.3 Bilan volumique pendant un intervalle de temps Δt

On fait tout d'abord le bilan de volume. Pendant un intervalle de temps Δt , il entre un volume d'eau ΔV_e et il sort un volume de fluide ΔV_{sf} . La conservation du volume pendant l'intervalle de temps Δt impose donc:

$$v_{fn+1} = v_{fn} + \Delta V_e - \Delta V_{sf} \quad (4.4)$$

Les termes de l'équation 4.4 sont reliés aux paramètres du problème par les équations suivantes:

$$\Delta V_e = \frac{I \cdot A \cdot \Delta t}{\rho_e} \quad (4.5)$$

$$v_{fn} = A \cdot h_n \quad (4.6)$$

$$v_{fn+1} = A \cdot h_{n+1} \quad (4.7)$$

On peut donc en déduire le volume de fluide sortant pendant l'intervalle de temps Δt :

$$\boxed{\Delta v_{sf} = \frac{I \cdot A \cdot \Delta t}{\rho_e} + A \cdot (h_n - h_{n+1})} \quad (4.8)$$

On fait maintenant le bilan de masse totale. Pendant l'intervalle de temps Δt , il entre une masse d'eau Δm_e et il sort une masse de fluide Δm_{sf} . La conservation de la masse totale pendant l'intervalle de temps Δt impose donc:

$$m_{f(n+1)} = m_f + \Delta m_e - \Delta m_{sf} \quad (4.9)$$

Les termes de l'équation 4.9 sont reliés aux paramètres du problème par les équations suivantes:

$$m_{f(n+1)} = \rho_{f(n+1)} \cdot A \cdot h_{n+1} \quad (4.10)$$

$$m_{fn} = \rho_{fn} \cdot A \cdot h_n \quad (4.11)$$

$$\Delta m_e = I \cdot A \cdot \Delta t \quad (4.12)$$

$$\Delta m_{sf} = \rho_{fn} \cdot \Delta v_{sf} \quad (4.13)$$

On peut donc transformer l'équation 4.9 de la manière suivante:

$$\rho_{f(n+1)} \cdot h_{n+1} = \rho_{fn} \cdot h_n + I \cdot \Delta t - \frac{\rho_{fn} \cdot \Delta v_{sf}}{A} \quad (4.14)$$

En introduisant le volume Δv_{sf} , on obtient l'équation de variation de la densité dans l'intervalle de temps Δt :

$$\rho_{f(n+1)} = \rho_{fn} + \frac{I}{h_{(n+1)}} \cdot (1 - \frac{\rho_{fn}}{\rho_w}) \cdot \Delta t \quad (4.15)$$

Enfin, on fait le bilan de masse d'eau. Pendant l'intervalle de temps Δt , il entre une masse d'eau Δm_e et il sort une masse d'eau Δm_{se} . La conservation de la masse d'eau pendant Δt impose donc:

$$m_{e(n+1)} = m_{en} + \Delta m_e - \Delta m_{se} \quad (4.16)$$

Les termes de l'équation 4.16 sont reliés aux paramètres du problème par les équations suivantes:

$$m_{e(n+1)} = D_{n+1} \cdot \rho_{f(n+1)} \cdot A \cdot h_{n+1} \quad (4.17)$$

$$m_{en} = D_n \cdot \rho_{fn} \cdot A \cdot h_n \quad (4.18)$$

$$\Delta m_{se} = D_n \cdot \rho_{fn} \cdot \Delta v_{sf} \quad (4.19)$$

En introduisant l'équation 4.8 dans les équations précédentes, on peut obtenir l'équation de variation de la dilution:

$$D_{n+1} = \left(\frac{\rho_{fn}}{\rho_{f(n+1)}} \right) \cdot D_n + \frac{I \cdot \Delta t}{\rho_{f(n+1)} \cdot h_{n+1}} \cdot \left(1 - D_n \cdot \frac{\rho_{fn}}{\rho_w} \right) \quad (4.20)$$

Enfin, en appliquant l'équation 4.15 on obtient l'équation donnant la dilution pour chaque intervalle de temps Δt :

$$D_{n+1} = D_n + \frac{I(1 - D_n) \cdot \Delta t}{\rho_{f(n+1)} \cdot h_{n+1}} \quad (4.21)$$

On notera que la densité au temps t_{n+1} doit être calculée avant la dilution au temps t_{n+1} .

Nous avons développé deux programmes pour la résolution des équations 4.15 et 4.21, l'une à partir des épaisseurs du fluide mesurées en fonction du temps en condition de précipitations, et l'autre à partir des épaisseurs du fluide mesurées en fonction du temps pour différents niveaux de dilution mesurés en l'absence de précipitations.

4.5 Modèle avec précipitations

4.5.1 Loi d'épaisseur

Les mesures expérimentales en condition de précipitations montrent que l'épaisseur de tous les types de fluide présente sensiblement la même loi en fonction du temps. La figure 4.4 présente un exemple de l'épaisseur mesurée pour trois types de fluide commerciaux, soit le Type I (A649), le Type II (A344) et le Type III (A553).

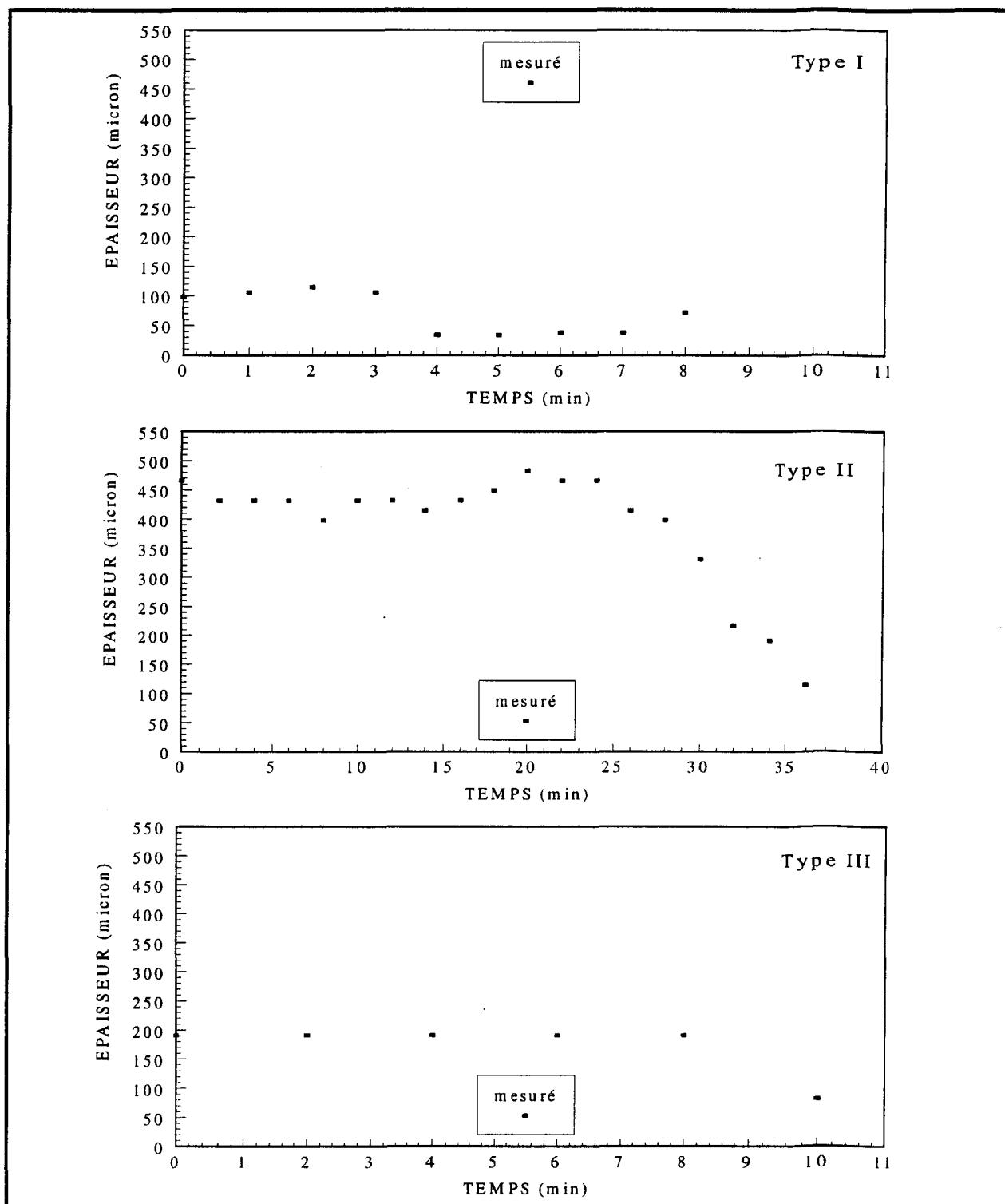


Figure 4.4 Épaisseurs mesurées pour trois types de fluide en fonction des précipitations

4.5.2 Établissement de la loi d'épaisseur

La loi de variation de l'épaisseur peut être représentée par l'équation suivante:

$$h(t) = h_0 - b \cdot (t - t_1) \cdot H(t) \quad (4.22)$$

où $H(t)$ est la fonction échelon présentée à la figure 4.5

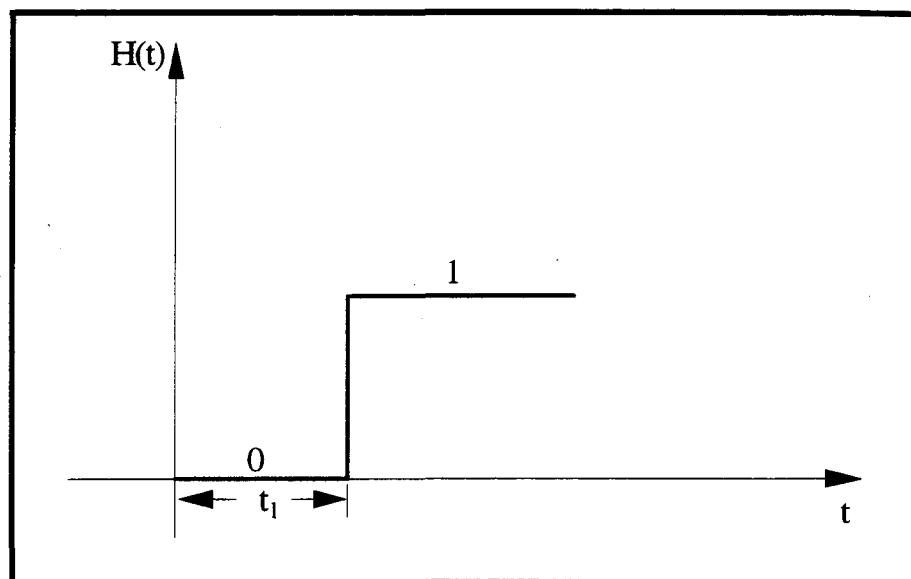


Figure 4.5 Fonction échelon

Un programme de calcul a été développé pour obtenir de façon objective et systématique la loi d'épaisseur selon l'équation 4.22 en fonction des valeurs expérimentales telles qu'indiquées aux figures 4.4. Ce programme permet de calculer les constantes h_0 , b et t_1 par optimisation d'un double lissage. L'organigramme de la méthode numérique est donné à la figure 4.6. Les résultats de lissage sont montrés aux figures 4.7, 4.8 et 4.9.

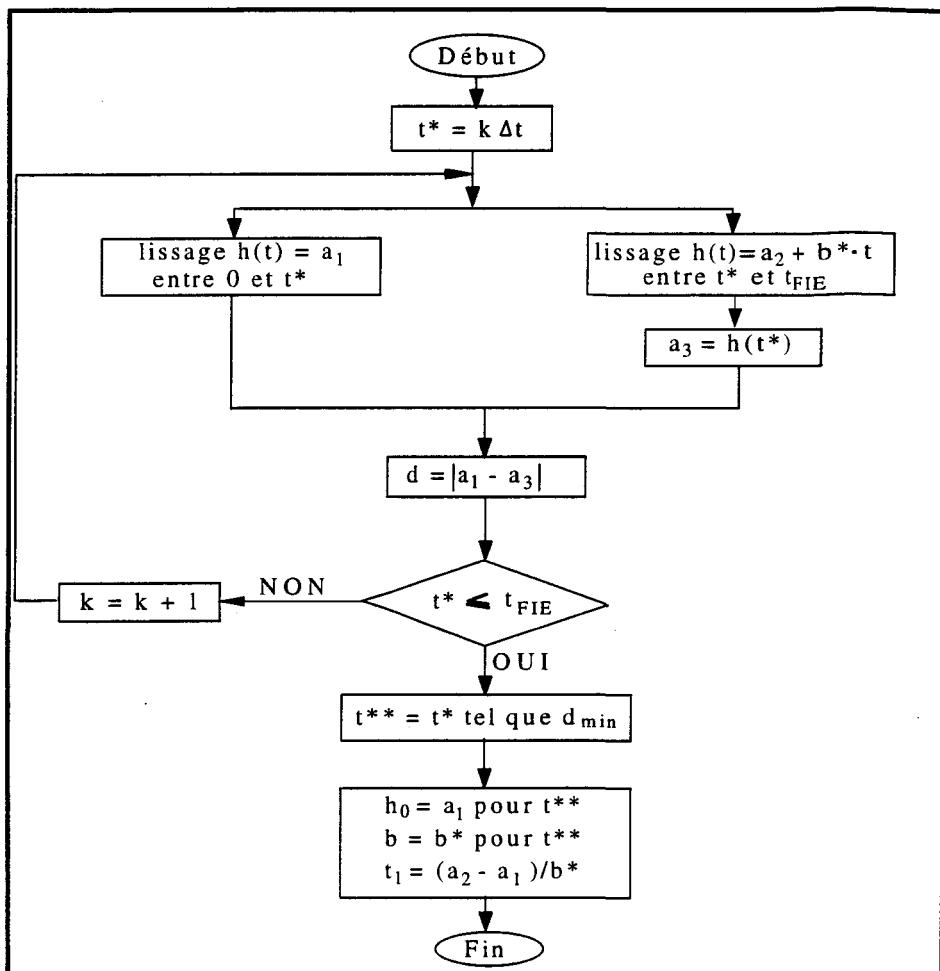


Figure 4.6 Organigramme du programme de simulation du modèle 1

4.5.3 Prédiction des temps de protection

On utilise pour la prédiction des temps de protection les données expérimentales d'épaisseurs obtenues avec des précipitations de gouttelettes surfondues simulant la pluie verglaçante. Le produit utilisé dans ce travail est

le fluide expérimental A344 qui est un mélange de deux glycols, plus précisément de 20 % d'éthylène glycol et de 35 % de dithylène glycol. Ceci rend délicate l'estimation du point de congélation. La congélation de l'éthylène glycol à -5 °C est obtenue à 86 % de dilution, et dans le cas du dithylène, à 76 % de dilution. On considérera donc que le fluide A344 congèle à -5 °C à 81 % de dilution ($0.20 \times 86\% + 0.35 \times 76\%$). Le programme est capable de calculer pour chaque intervalle de temps la dilution maximale et la densité minimale à une température donnée à partir des valeurs des épaisseurs, ces dernières pouvant être mesurées pour des intensités données de précipitations.

Le programme exécute les itérations à partir du temps initial jusqu'au temps de congélation associé au produit de la simulation. Le code source du programme du premier modèle de simulation est présenté en détail à l'annexe D. Les résultats des calculs de densité et de dilution en utilisant le modèle 1 pour les intensités de 5,22, 5,53 et 5,64 g/dm²h sont présentés aux figures 4.10, 4.11, 4.12. Les détails des calculs sont, pour leur part, montrés à l'annexe E.

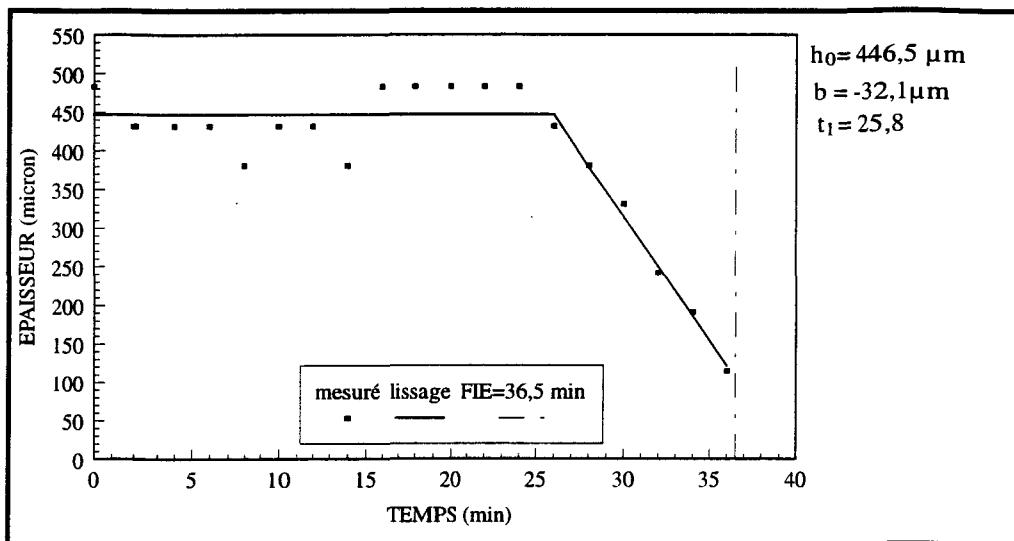


Figure 4.7 Épaisseurs mesurées et lissées à une intensité de 5,22 g/dm²h

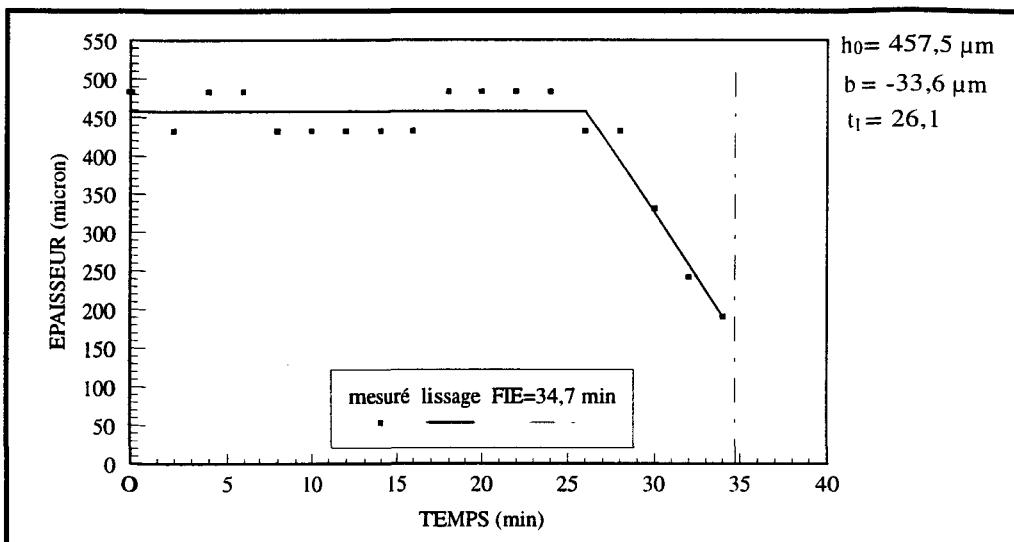


Figure 4.8 Épaisseurs mesurées et lissées à une intensité 5,53 g/dm²h

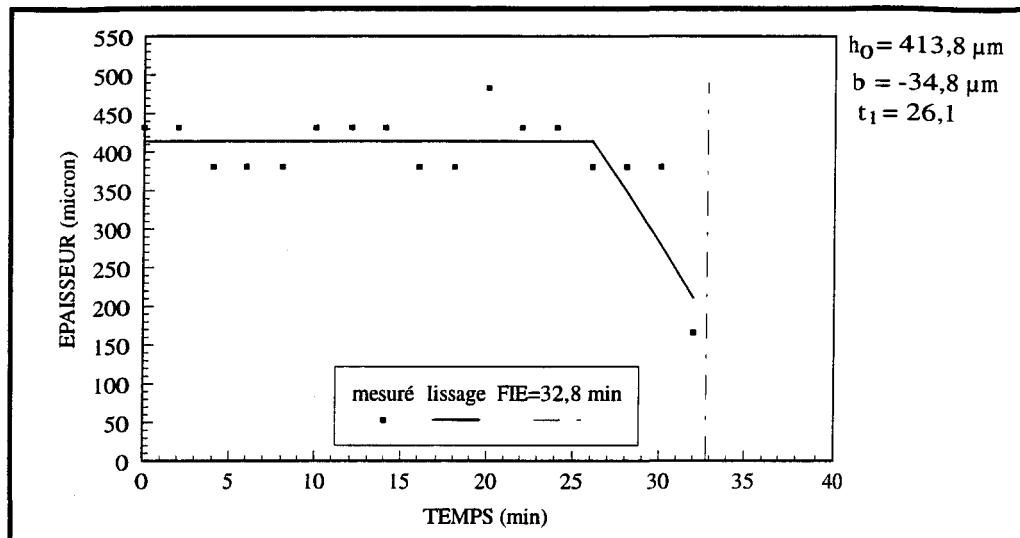


Figure 4.9 Épaisseurs mesurées et lissées à une intensité de 5,64 g/dm²h

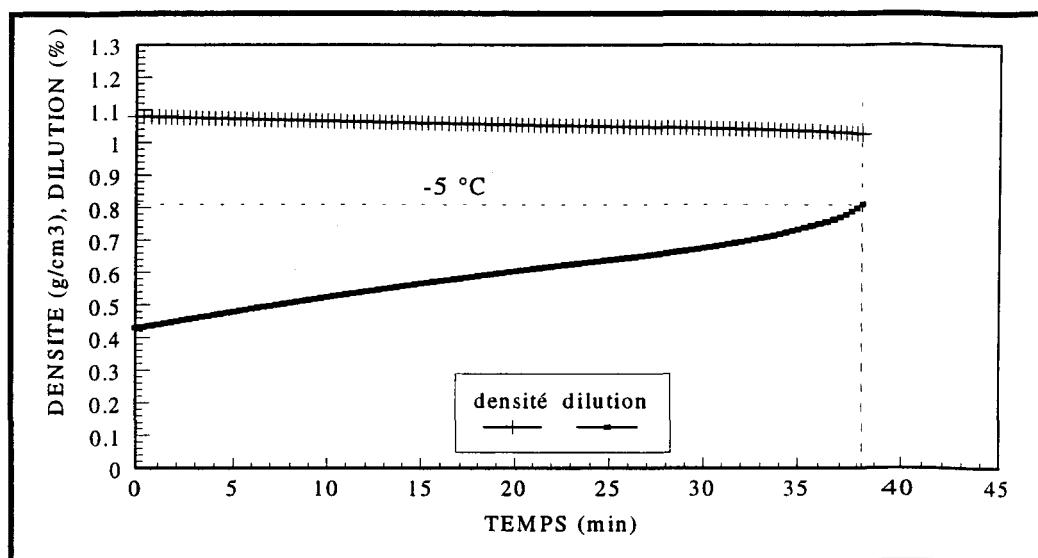


Figure 4.10 Densité et dilution du mélange fluide/eau calculées en fonction du temps avec le modèle 1 pour une intensité de 5,22 g/dm²h

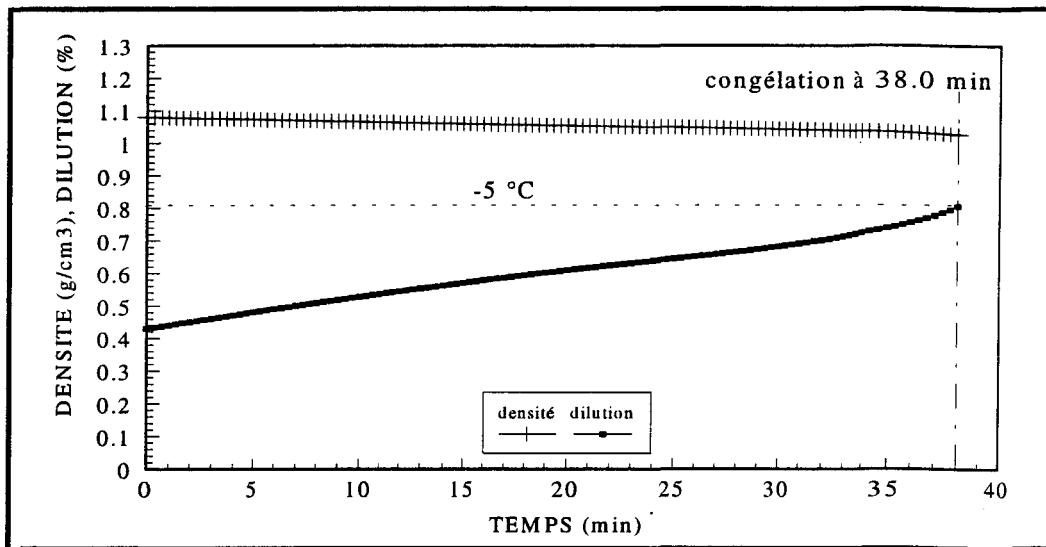


Figure 4.11 Densité et dilution du mélange fluide/eau calculées en fonction du temps avec le modèle 1 pour une intensité de 5,53 g/dm²h

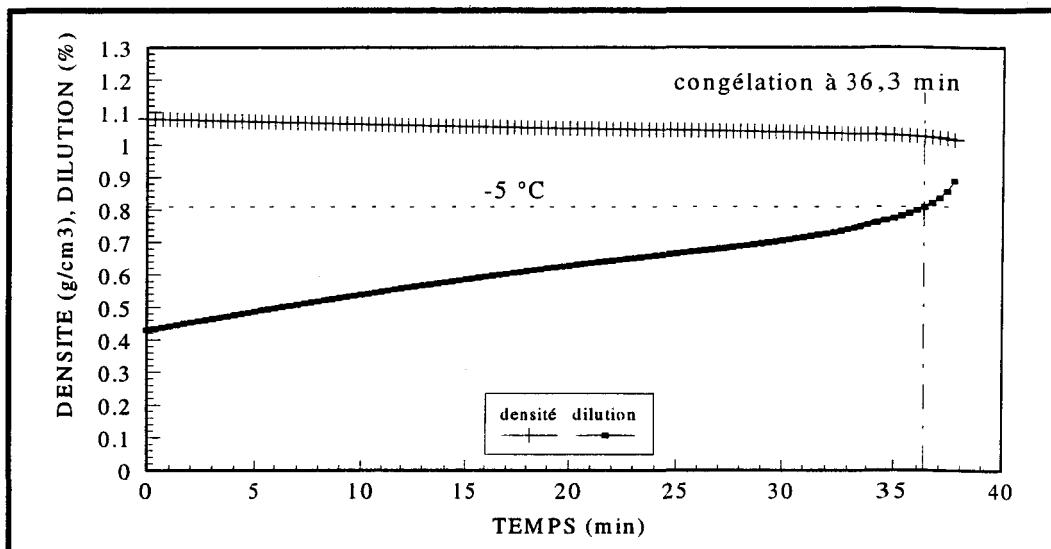


Figure 4.12 Densité et dilution du mélange fluide/eau calculées en fonction du temps avec le modèle 1 pour une intensité de 5,64 g/dm²h

4.5.4 Validation du modèle 1

La validation du modèle est effectuée en comparant les temps de protection calculés par le modèle 1 aux valeurs mesurées lors des essais en laboratoire en condition réelle de précipitations. La validation reste limitée en raison des variations de l'épaisseur occasionnées par les fluctuations dans l'intensité des précipitations, car on ne peut pas obtenir exactement la même intensité de précipitations d'un essai à l'autre.

Le tableau 4.1 compare les temps de protection calculés par le modèle 1 aux temps de protection FIE et MIT mesurés pendant les essais dans les conditions $I = 5 \text{ g/dm}^2\text{h}$ et $T = -5^\circ\text{C}$. Les différences entre les temps de protection calculés par le modèle 1 et les mesures expérimentales varient de 2 à 4 minutes pour le FIE et de 0 à 2 minutes pour le MIT. Les différences observées dans ce dernier cas étant de l'ordre de la précision des mesures expérimentales. Les temps de protection correspondant à la moyenne d'un front de glace apparaissent être plus précis que ceux correspondant au premier cristal de glace touchant la ligne de 25 mm. Ceci pourrait être explicable par l'utilisation du volume moyen dans le modèle qui s'appuie sur l'épaisseur mesurée à 25 mm. D'autre part, le front de glace ne progresse pas exactement en un front uniforme (ligne droite) pendant l'essai (voir la photo 4.2). La morphologie du front de glace peut être influencée par plusieurs facteurs aléatoires qui peuvent provoquer un manque d'homogénéité latérale: distribution de la grosseur des gouttes, refroidissement de la plaque, effet de

la bordure, etc. En conséquence, le MIT qui récupère les fluctuations latérales du front de glace, est donc plus proche que le FIE du calcul numérique unidimensionnel. Toutefois, même si le modèle est jugé satisfaisant, il nécessite la mesure des épaisseurs sous précipitations dans différentes conditions, ce qui requiert un travail relativement laborieux si on veut prédire toutes les conditions possibles.

Tableau 4.1 Comparaison de valeurs expérimentales à celles calculées par le modèle 1

Intensité (g/dm ² h)	Temps de protection (min)			Différence de %	
	valeur calculée	FIE mesuré	MIT mesuré	FIE	MIT
5,22 ± 0,29	38,3 ± 1,0	36,5	38,3	+ 4,9	0
5,53 ± 0,12	38,0 ± 1,0	34,7	36,5	+ 11,8	+ 4,1
5,64 ± 0,13	36,3 ± 0,4	32,8	35,2	+ 10,7	+ 3,1

4.6 Modèle sans précipitations

La mesure des épaisseurs en condition de précipitations et l'utilisation des équations 4.12 et 4.18 pour prédire les temps de protection est une méthode simple et directe, mais peu pratique ni générale. Ce modèle a beaucoup de limitations, la plus importante étant la nécessité de mesurer

l'épaisseur du fluide à chaque intensité de précipitations. Il y a donc lieu de définir un modèle moins limitatif.

Le second modèle développé ici ne nécessitant pas la mesure des épaisseurs dans toutes les conditions de précipitations est appelé modèle sans précipitations. Mais il nécessite toutefois de mesurer l'épaisseur du fluide en l'absence de précipitations en fonction du temps à différents niveaux de dilution du fluide. Le modèle développé utilise, pour les calculs de la dilution et de la densité, les équations 4.15 et 4.21 déjà définies dans le premier modèle.

4.6.1 Loi d'épaisseur sans précipitations

L'épaisseur d'un fluide mesurée à différentes dilutions en fonction du temps peut être représentée par une loi exponentielle de la forme

$$h = h_0 \cdot \exp(-t/\tau) \quad (4.23)$$

où h_0 est l'épaisseur du fluide mesurée 5 minutes après son application et τ , une constante particulière à chaque dilution. Le temps initial de la mesure de l'épaisseur débute cinq minutes après l'application de fluide.

Les épaisseurs du produit A344 mesurées sans précipitations en fonction du temps pour cinq différents niveaux de dilution, soit 0.43, 0.50,

0.60, 0.70, et 0.80, sont présentées à la figure 4.13. Les paramètres de lissage h_0 et τ sont donnés au tableau 4.2.

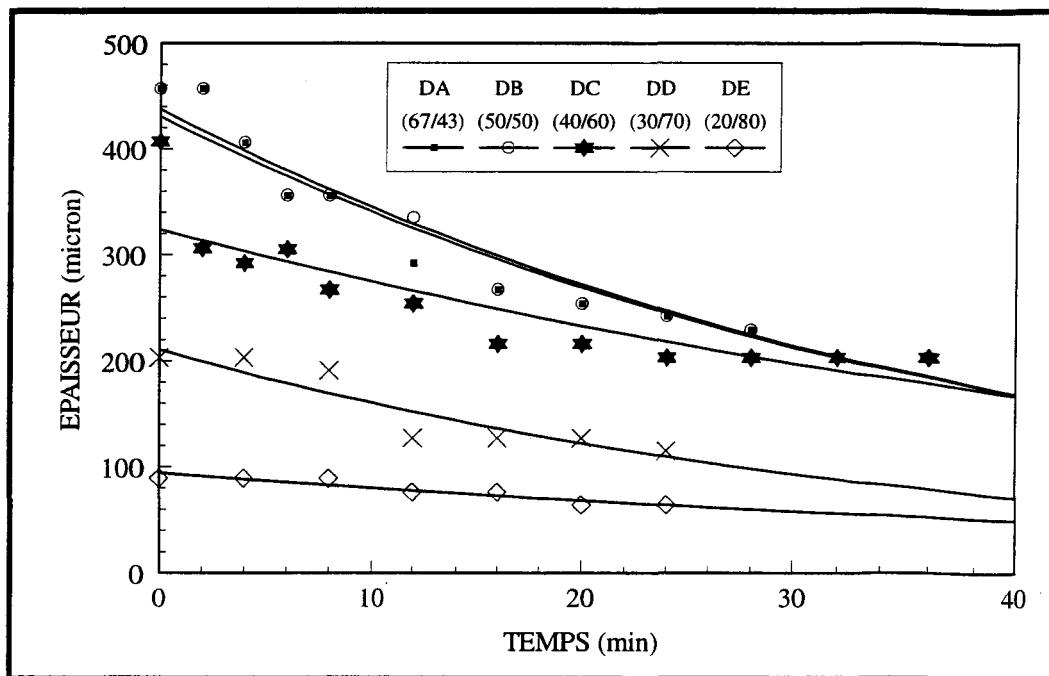


Figure 4.13 Épaisseur du fluide A344 à différents niveaux de dilution

Tableau 4.2 Valeurs de paramètres de la loi d'épaisseur

Dilution(eau:glycol) (%)	h_0 (μm)	τ (min)	R^2
D _A (43:67)	430,56	42,55	0,95
D _B (50:50)	437,60	41,67	0,96
D _C (60:40)	323,79	60,61	0,80
D _D (70:30)	216,44	36,76	0,84
D _E (80:20)	93,96	62,11	0,89

4.6.2 Méthode de calculs

On sait que $h(D_i, t) = h_{0i} \cdot \exp(-t/\tau_i)$, $D_i = D_A, D_B, D_C, D_D, D_E \dots$, h_{0i} et τ_i sont les paramètres du lissage à la dilution D_i , $h_{0i} = h_0(D_i)$, $\tau_i = \tau(D_i)$.

L'algorithme comprend trois étapes de calculs basées sur les courbes $h(t)$ à différentes dilutions:

étape 1. Connaissant les valeurs de h_n et de D_n au temps t_n , on calcule τ_n et h_{on} par interpolation entre les deux valeurs de dilution expérimentales (D_A, D_B, D_C , etc.) pour lesquelles on a les valeurs h_0 et τ ; puis on calcule le temps t_{en} équivalent à t_n sur la courbe $h(t)$ correspondant à la dilution.

étape 2. Sur la courbe $h(t)$ à D_n , on prend alors: $h_{n+1} = h(t_{en} + \Delta t)$.

étape 3. On calcule D_{n+1} et ρ_{n+1} par les mêmes formules de calculs que pour le modèle utilisant la loi avec précipitations (équations 4.15 et 4.21).

La méthode de calcul est illustrée à la figure 4.14.

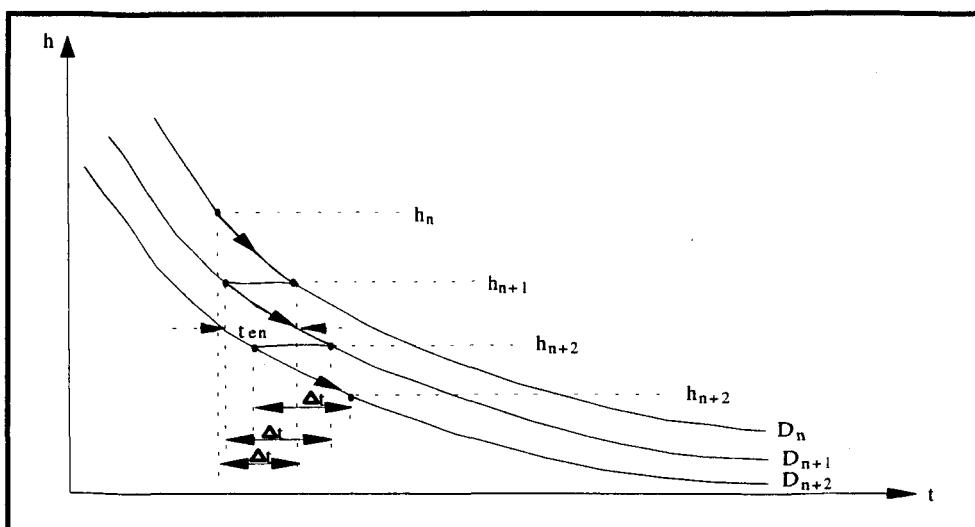


Figure 4.14 Méthode de détermination de l'épaisseur

4.6.3 Prédiction des temps de protection

Pour les calculs des temps de protection avec le second modèle, on utilise les données d'épaisseurs mesurées avec le produit A344 en l'absence de précipitations (figure 4.13). Les épaisseurs ont été mesurées en fonction du temps pour cinq différentes dilutions et les paramètres de lissage ont été présentés précédemment à la figure 4.14 et au tableau 4.2. Le programme est capable de calculer à partir des valeurs initiales de dilution et d'épaisseur, la dilution maximale et la densité minimale à une température donnée.

Pour calculer la densité et la dilution, le programme du modèle 2 se base sur les épaisseurs mesurées en fonction du temps et de la dilution, présentées à la figure 4.14 et au tableau 4.2. Le code source du programme de simulation du modèle 2 est détaillé à l'annexe F. Les résultats, compilés à l'annexe G à titre d'exemple, sont présentés aux figures 4.15, 4.16 et 4.17 pour les intensités 5.22, 5.53, 5.64 g/dm²h.

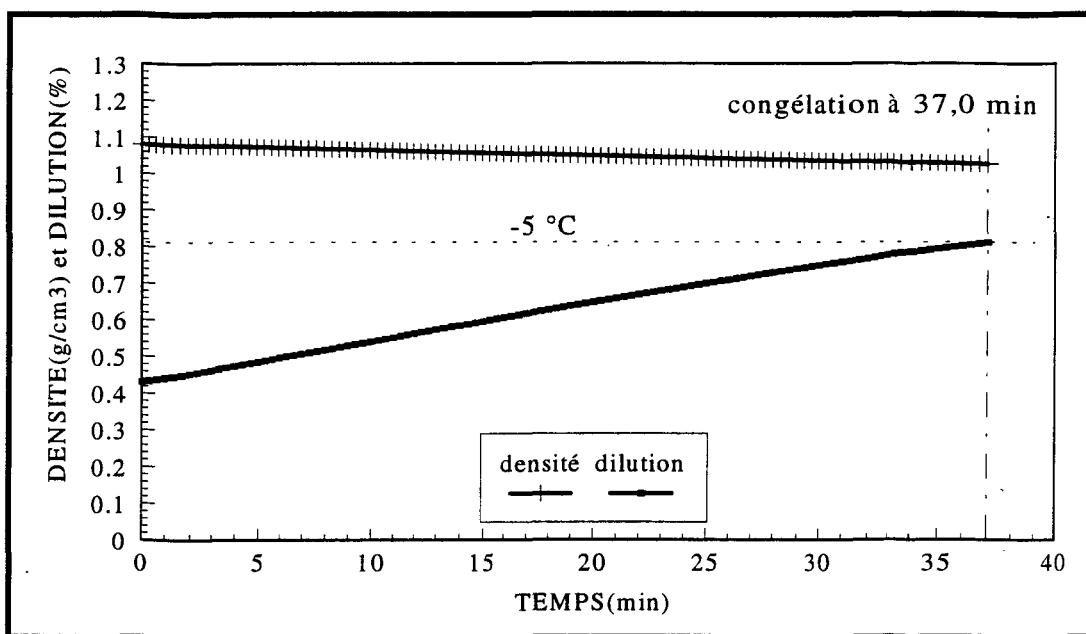


Figure 4.15 Densité et dilution du mélange fluide/eau calculées en fonction du temps pour une intensité de 5,22 g/dm²h (modèle 2)

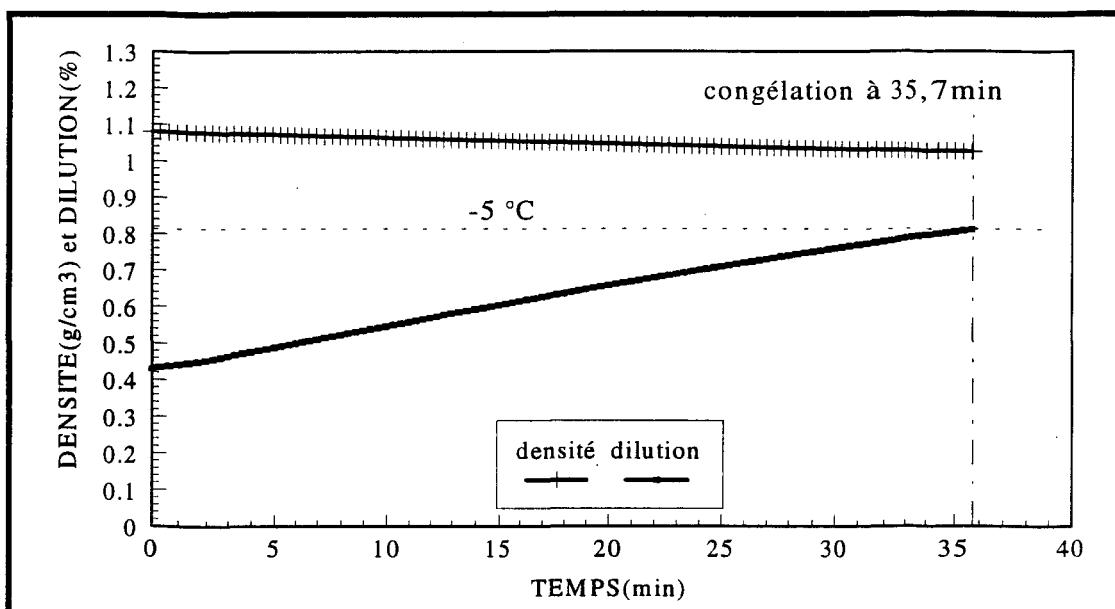


Figure 4.16 Densité et dilution du mélange fluide/eau calculées en fonction du temps pour une intensité de 5,53 g/dm²h (modèle 2)

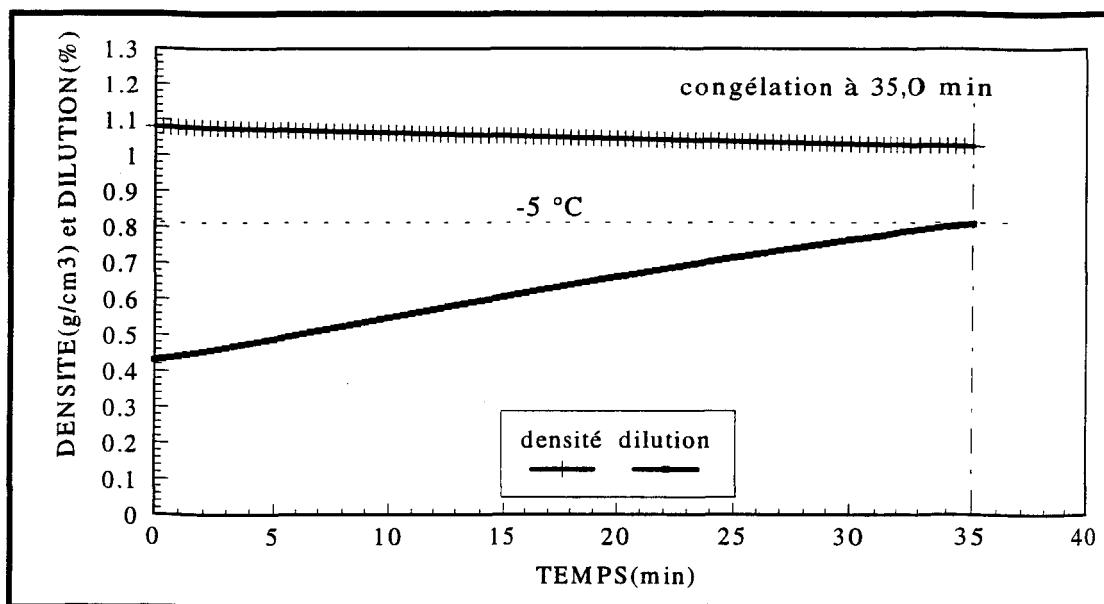


Figure 4.17 Densité et dilution du mélange fluide/eau calculées en fonction du temps pour une intensité de 5,64 g/dm²h (modèle 2)

Comme dans le premier modèle, le temps de protection dans le second modèle correspond au temps pour lequel le niveau de dilution atteint la température de congélation (voir figure 4.1).

4.6.4 Validation du modèle 2

Avec le modèle 2, il est possible de prédire le temps de protection non seulement à -5 °C, mais également de l'extrapoler à différentes températures et à différentes intensités de précipitations. La validation de ce second modèle consiste à comparer les valeurs calculées pour différentes températures et pour différents niveaux de précipitations, à celles mesurées

expérimentalement. Comme avec le premier modèle, le produit expérimental A344 est utilisé pour cette comparaison.

4.6.4.1 Effet de l'intensité de précipitations

Les temps de protection pour les intensités de 0.42, 1.52, 3.04, 5.69, 14.40, 23.67 g/dm²h ont été calculés à -5 °C avec le modèle 2. Les détails des calculs sont donnés à l'annexe I. La comparaison des temps de protection calculés aux mesures expérimentales en fonction de l'intensité de précipitations est présentée au tableau 4.3 et à la figure 4.18.

Tableau 4.3 Comparaison des temps de protection calculés et mesurés pour différentes intensités à -5 °C

Intensité (g/dm ² h)	Temps de protection (min)			Différence en %	
	valeur calculée	FIE mesuré	MIT mesuré	FIE	MIT
0,42 ± 0,02	127,0 ± 1,2	155,4 ± 5,2	168,4 ± 8,0	- 18,3	- 24,6
1,52 ± 0,05	76,7 ± 1,0	52,4 ± 1,3	60,4 ± 0,8	+ 46,4	+ 27,0
3,04 ± 0,08	52,7 ± 1,0	47,7 ± 4,4	56,6 ± 0,9	+ 10,5	- 6,9
5,69 ± 0,25	34,7 ± 0,9	32,6 ± 2,2	35,3 ± 0,7	+ 6,4	- 1,7
14,40 ± 0,39	17,0 ± 0,3	18,3 ± 0,1	21,2 ± 0,3	- 7,1	- 19,8
23,67 ± 0,98	11,0 ± 0,2	12,7 ± 0,9	15,4 ± 0,9	- 13,4	- 28,6

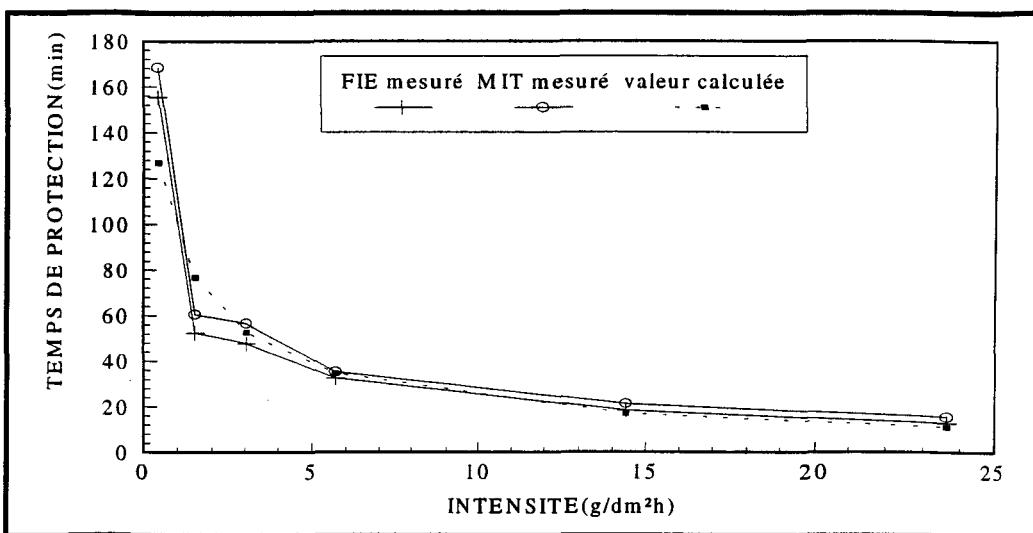


Fig. 4.18 Comparaison des temps de protection calculés et mesurés pour différentes intensités de précipitations à -5 °C

Le tableau 4.3 montre que les temps de protection calculés, correspondent sensiblement aux valeurs moyennes des fronts de glace. Il montre aussi que, l'écart entre la valeur calculée et la valeur mesurée est le plus faible à -5 °C étant celui correspondant à une intensité de 5 g/dm²h, soit la condition où tous les paramètres sont mesurés. Pour les niveaux de sévérité léger et le niveau élevé des précipitations, les écarts sont grands. Ces écarts proviendraient de la dilution elle-même et des facteurs non considérés dans le modèle, comme la fluctuation de la température du fluide et la chaleur de dilution. Les erreurs en provenance de ce modèle seront discutées au chapitre 5.

4.6.4.2 Effet de la température

Les temps de protection pour les températures de -10 °C et de -15 °C ont été calculés avec le modèle 2 en utilisant les épaisseurs du fluide

mesurées à -5°C . La comparaison des temps de protection calculés aux valeurs mesurées à -5 , -10 et -20°C est illustrée au tableau 4.4 et à la figure 4.19. Pour les calculs, on considère que les niveaux des dilutions de 0.81, 0.76 et 0.69 correspondent respectivement aux points de congélation de -5 , -10 et -15°C .

Tableau 4.4 Comparaison des temps de protection calculés à ceux observés à trois températures

Température ($^{\circ}\text{C}$)	Intensité ($\text{g}/\text{dm}^2\text{h}$)	Temps de protection (min)			Différence en %	
		valeur calculée	FIE mesuré	MIT mesuré	FIE	MIT
-5	$5,69 \pm 0,25$	$34,7 \pm 0,9$	$32,6 \pm 2,2$	$35,3 \pm 0,7$	+ 6,4	- 1,7
-10	$5,97 \pm 0,17$	$28,3 \pm 0,5$	$23,4 \pm 0,5$	$33,7 \pm 3,2$	+ 17,3	- 16,0
-15	$6,00 \pm 0,37$	$21,1 \pm 0,8$	$15,6 \pm 0,4$	$20,3 \pm 3,1$	+ 6,1	+ 3,9

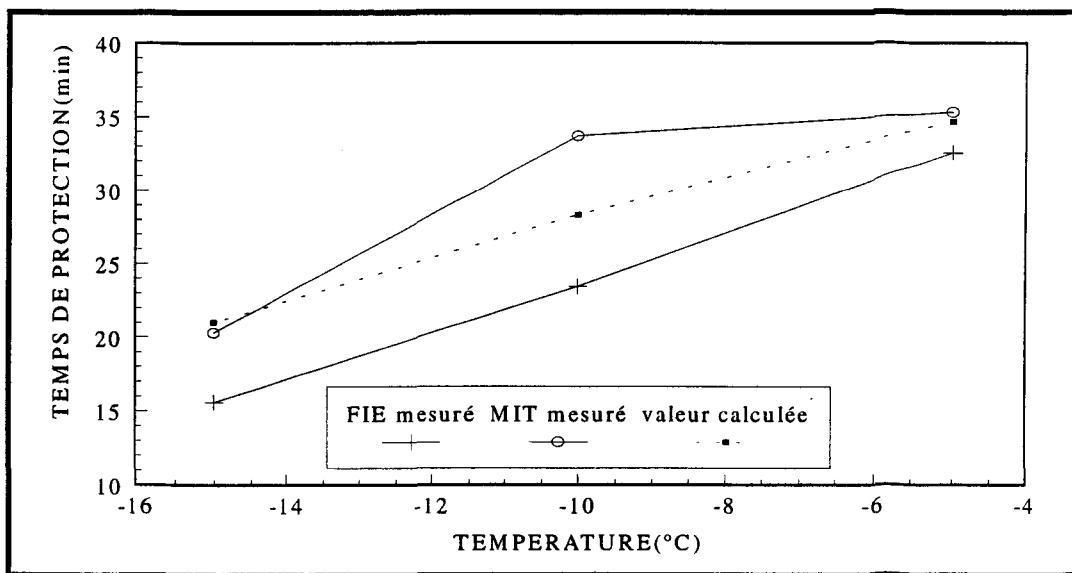


Fig. 4.19 Comparaison des temps de protection calculés et mesurés à différentes températures

CHAPITRE 5

Discussion

Dans la discussion, nous ferons tout d'abord une comparaison des deux modèles développés en établissant les mérites propres à chacun. Nous traiterons ensuite de la qualité des temps de protection prédicts par le second modèle en analysant les sources d'erreurs expérimentales compte tenu des hypothèses de départ.

5.1 Comparaison des modèles

Considérant un mécanisme de congélation, nous avons développé deux modèles simples qui sont capables de prédire un temps de protection qui s'approche plus du temps moyen MIT que du temps du premier contact FIE à la ligne de 25 mm. Le tableau 5.1 qui compare les mérites respectifs des deux modèles, fait ressortir que le second modèle est beaucoup plus performant que le premier modèle pour prédire les temps de protection. Ce dernier, en effet, est capable d'extrapoler les temps de protection à différentes intensités et à différentes températures à partir de données à -5 °C. Il constitue un élément

important pour la prédition des temps de protection, particulièrement lorsqu'on sera capable de modéliser l'épaisseur du fluide sur une plaque inclinée à partir de la viscosité.

Tableau 5.1 Comparaison entre le modèle 1 et le modèle 2

Élément	Modèle 1	Modèle 2
Mesures des épaisseurs	Avec précipitations Une seule dilution	Sans précipitations Différentes dilutions
Effet de l'inclinaison	10° seulement	10 ° seulement
Effet de l'intensité de précipitations	Non	Extrapolation à partir des données à -5 °C
Effet de la température	Non	Extrapolation à partir des données à -5 °C

5.2 Qualité et précision du second modèle

Les écarts entre les valeurs mesurées et celles prédites par le modèle sont en général plus grands que ceux attendus si l'on considère les erreurs expérimentales en jeu: le vent, la fluctuation de température de l'air et du fluide et la chaleur de dilution.

Discutons en premier lieu du facteur vent. La vitesse du vent de $0,3 \pm 0,1$ m/s dans la zone d'essais est très faible. Cette vitesse, à notre opinion, n'apparaît pas suffisamment élevée pour influencer l'écoulement du fluide de même que les changements thermiques; c'est pourquoi le vent apparaît ici comme un facteur négligeable.

Considérons en second lieu les fluctuations de température de l'air et du fluide. Des deux températures, c'est la température du fluide qui est la plus importante. Si on examine les temps de tenue montrés à la figure 3.6, on note que pour une différence de 10°C dans la température du fluide, on mesure une pente de $2 \text{ min}/^{\circ}\text{C}$ à l'intensité de $5 \text{ g/dm}^2\text{h}$. L'écart maximal observé dans la température du fluide est de l'ordre de $0,5^{\circ}\text{C}$, ce qui correspond à une minute d'erreur à l'intensité de $5 \text{ g/dm}^2\text{h}$.

Considérons enfin le dernier facteur, soit la chaleur de dilution. Le fluide dilué par l'eau est réchauffé par la chaleur libérée lors du mélange, ce qui entraîne une augmentation du temps nécessaire à la progression du front de glace; comme les valeurs prédictes sont en général de 10 % inférieures aux valeurs mesurées, un modèle qui tiendrait compte de ce facteur (chaleur dilution) devrait augmenter les valeurs des temps calculés.

Si le second modèle reste satisfaisant aux intensités de $3 \text{ g/dm}^2\text{h}$ et $5 \text{ g/dm}^2\text{h}$, il apparaît beaucoup moins convenable aux autres intensités de $0,4 \text{ g/dm}^2\text{h}$, $1,5 \text{ g/dm}^2\text{h}$, $14 \text{ g/dm}^2\text{h}$ et $24 \text{ g/dm}^2\text{h}$. Les raisons qui expliqueraient ces comportements seraient:

1. Les mécanismes de dilution peuvent différer selon les conditions environnementales.

2. L'hypothèse initiale à l'effet qu'il n'a pas de gradient de précipitations dans le fluide perpendiculaire à la surface de plaque, c'est-à-dire que l'eau de précipitations et le fluide sont bien mélangés. Pour le niveau léger des précipitations, la concentration du fluide change lentement. Suivant la direction perpendiculaire à la surface de la plaque, l'eau de précipitations diffuse lentement de haut en bas de la surface du fluide; de la même façon, pour un niveau de précipitations élevé, la dilution a moins de temps pour se faire parfaitement. Dans ce dernier cas, les gouttelettes gèlent directement en surface du film du fluide. Il apparaît également nécessaire de développer un modèle à deux dimensions capable de tenir compte des vitesses de gouttelettes d'eau.

CHAPITRE 6

Conclusions

Dans ce mémoire, nous avons mesuré les temps de protection d'un produit antigivre dans différentes conditions climatiques susceptibles d'être rencontrées au niveau du sol.

L'analyse des données recueillies permet de relier les temps de protection t mesurés à l'intensité des précipitations I , à la température du fluide T et à l'inclinaison de la plaque β en accord avec une relation empirique ayant la forme suivante:

$$t(\text{min}) = K_1 \cdot I^n \cdot e^{cT} \cdot \beta^m \quad (6.1)$$

Cette relation empirique peut servir pour calculer les temps de protection à partir des paramètres extérieurs, en particulier l'intensité de précipitations, et la température du fluide; ces deux facteurs ressortent comme étant les plus importants. Il apparaît donc possible de prédire les temps de

protection compte tenue des paramètres environnementaux. Il faut remarquer que l'inclinaison de la plaque β est indépendante de l'intensité de précipitations I et de la température T, toutefois le paramètre n varie avec la température T.

Deux modèles simples basés sur les épaisseurs mesurées en condition de précipitations (pour le modèle 1) et en l'absence de précipitations (pour le modèle 2), permettent de calculer le contenu en eau (dilution) et la densité du fluide en fonction du temps.

Cette étude fait ressortir les effets de la dilution en jeu lors de la contamination des fluides appliqués sur les avions occasionnée par les précipitations de gouttelettes surfondues. Les effets de dissolution en jeu avec des particules solides de glace ou de neige n'ont pas été étudiés de même que ceux liés aux précipitations surfondues à contenu de grosses gouttes, tel la bruine et la pluie verglaçante. Les effets des autres facteurs intrinsèques au fluide (chaleur de dissolution ou de mélange, les mécanismes de dilution) n'ont pas été considérés dans la modélisation. Il apparaît également donc nécessaire de développer un modèle plus sophistiqué capable de tenir compte de facteurs extérieurs (vitesse du vent, vitesse de chute et diamètre des gouttelettes surfondues). Ceci amènerait à mieux comprendre des phénomènes physiques en jeu et de ce fait contribuer au développement de produits plus efficaces et plus sécuritaires.

Bibliographie

- APS Aviation Inc., (1993). "Aircraft Ground De/Anti-Icing Fluid Holdover Time Field Testing Program for the 1992 - 1993 Winter". Final Report, Oct. 1993.
- Association of European Airlines Task Force on De/Anti-icing(AEA), (1988). "Recommendations for De/Anti-icing of Aircraft on Ground". 4th version, Hamburg.
- Boeing Co., (1990). "Boeing 737-200 Maintenance Manual". Feb. 20, 1990, Chap. 12-50-0.
- Bragg, M. B. and Gregorek, G.M., (1983). "An analytical evaluation of the icing properties of several low and medium speed airfoils". AIAA 83-01109.
- FAA Circular 20-117, U.S., (1982), "Hazards Following Ground Deicing and Ground Operation in Conditions Conduc to Aircraft Icing". Dept. of Transporation, Washing, DC. Dec. 17, 1982.
- Godard, Serge, (1960). "Mesure des gouttelettes de nuage avec un film de collagol". Bull. Obs. Puy de dome, N° 2, avril - juin, 1960, p. 41 - 46.
- Golitzine N., (1960). "Method for measuring the size of water droplet in clouds, fogs, and sprays". (1951). National Aeronautical of Canada Note No. 6 (ME - 177), 1951.

- Hendrickson, G. S. and Hill, E. G., (1987). "Effects of Aircraft De/Anti-icing Fluids on Airfoil Characteristic". Paper Presented at the Von Korman Institute for fluid Dynamics Lecture Series entitled " Influence of Environmental Factors on Aircraft Performance " Brussels, Belgium, Feb. 1987.
- Hill, Eugene, (1988). Aircraft Ground Deicing Conference Proceedings, P- 217, Society of Automotive Engineers, Denver, Colorado, September 20-22, 1988, p. 67 - 84.
- Hill, Eugene G. and Zierten Thomas A., (1993). "Aerodynamic Effects of Aircraft Ground Deicing/Anti-Icing Fluids". Journal of Aircraft, vol.30, No. 1, Jan. - Feb. 1993, p. 24 - 34.
- Jim, Mclean, (1988). Aircraft Ground Deicing Conference Proceedings, P- 217, Society of Automotive Engineers, Denver, Colorado, September 20-22, 1988, p. 13 - 19.
- Laforte, J. L., Louchez, P. R., Bouchard, G., (1988). "Development of Testing Procedures Regarding performances of Aircraft Anti-icing Fluids". Final Report, Nov. 1988.
- Laforte, J. L., Louchez, P. R., Bouchard, G. and Ma, F., (1990). "A facility to evaluate performance of aircraft gound de/anti-icing fluids subjected to freezing rain". Cold Reg. Sci. Technol., 18, 1990, p. 161 - 171.
- Laforte, J. L., Louchez, P. R., Bouchard, G, (1992). "Cold and humid environment simulation for de/anti-icing fluids evaluation". Cold Reg. Sci. Technol., 20, 1992, p. 195 - 206.

Mikkelsen, K. L., Mcknight, R.C., Ranaudo, R.C. and Perkins,P.Jr.,(1985).

"Icing flight research: Aerodynamic effects of ice, and ice shape documentation with stero photography 11". AIAA 85-0468.

Reinmann John J., and Adams Dick, (1993). "Aerodynamic Effects of Deicing and Anti-Icing Fluids". Journal of Aircraft, vol. 30, No. 1, Jan. - Feb. 1993, p. 8 - 9.

ANNEXE A

**Observations des temps de protection sur l'effet de l'intensité de
givrage et la température**

Effet de l'intensité de givrage à -5°C

N° de l'essai	Intensité (g/dm ² h)	PLA. pos.	DÉBUT (min:sec)	FIE (min:sec)	MIT (min:sec)	PIL (cm/30min)
6I-0.3	0,43±0,06	1U	124:30	154:10	165:30	0,0
		3U	135:30	137:20	164:30	0,0
		2L	104:00	152:30	163:30	0,0
7I-0.3	0,42±0,02	2U	116:10	150:45	157:30	0,0
		1L	115:30	163:10	176:30	0,0
		3L	105:10	152:20	171:15	0,0
87I-1.4	1,54±0,16	1U	30:10	54:15	70:15	0,0
		3U	40:50	51:25	55:10	0,0
		2L	28:30	57:20	69:15	0,3
88I-1.4	1,52±0,05	2U	31:50	53:10	61:15	0,0
		1L	18:50	50:35	59:20	0,3
		3L	29:40	53:25	60:30	0,3
4I-2.5	3,00±0,50	1U	29:10	52:30	60:35	0,0
		3U	22:25	41:20	49:35	0,0
		2L	13:10	48:15	57:10	0,0
5I-2.5	3,04±0,08	2U	25:20	53:15	57:45	0,0
		1L	28:25	42:35	55:40	0,0
		3L	33:30	47:20	56:20	0,0
1I-5	4,98±0,34	1U	22:50	35:00	37:25	1,1
		3U	17:15	38:50	40:30	1,5
		2L	16:30	36:10	37:45	1,3
2I-5	5,69±0,25	2U	26:55	30:20	35:15	2,5
		1L	23:30	31:50	34:30	2,4
		3L	12:30	35:30	36:10	2,0
8I-10	13,50±1,20	1U	07:45	19:35	21:10	14,0
		3U	11:25	18:30	24:35	14,0
		2L	06:35	19:25	21:10	16,0
9I-10	14,40±0,39	2U	11:35	18:15	20:45	17,0
		1L	06:05	18:25	21:30	18,0
		3L	09:20	18:10	21:15	16,0
10I-20	23,89±2,50	1U	06:40	13:30	15:45	>30,0
		3U	08:10	13:20	14:30	>30,0
		2L	06:20	12:50	15:20	>30,0
11I-20	23,63±0,98	2U	06:30	11:45	14:45	>30,0
		1L	07:20	12:30	14:50	>30,0
		3L	08:20	13:50	16:40	>30,0

Effet de la température (T = -1°C)

N° d'essai	Intensité (g/dm ² h)	PLA. pos.	DÉBUT (min:sec)	FIE (min:sec)	MIT (min:sec)	PIL (cm/30min)
111T4I-0.3	0,70±0,08	1U	103:35	103:50	133:40	0,0
		3U	79:30	103:10	126:20	0,0
		2L	103:55	103:55	136:40	0,0
112T4I-0.3	0,78±0,04	2U	130:40	130:40	131:20	0,0
		1L	141:40	141:40	156:10	0,0
		3L	149:20	149:20	154:30	0,0
109T4I-1.4	1,74±0,19	1L	69:10	73:15	86:20	0,0
		3U	63:20	71:20	77:40	0,0
		2L	57:30	70:10	77:20	0,0
110T4I-1.4	1,74±0,07	2U	40:50	69:30	80:10	0,0
		1L	79:20	89:40	95:30	0,0
		3L	60:40	84:40	90:20	0,0
107T4I-2.5	3,20±0,42	1U	45:25	47:20	57:35	0,0
		3U	39:20	44:50	52:20	0,0
		2L	42:10	45:30	54:20	0,0
108T4I-2.5	3,09±0,27	2U	39:10	46:30	53:45	0,0
		1L	45:40	45:40	54:25	0,0
		3L	35:20	50:50	59:20	0,0
105T4I-5	4,66±0,37	1U	54:25	54:25	55:20	0,0
		3U	51:40	51:40	57:15	0,0
		2L	52:40	53:25	57:20	0,0
106T4I-5	5,89±0,20	1U	35:20	35:20	40:10	0,0
		1L	35:25	35:25	40:15	0,0
		3L	37:10	37:10	40:40	0,0
103T4I-10	13,47±0,97	1U	27:20	27:20	33:30	2,7
		3U	32:10	32:10	34:20	0,0
		2L	31:45	31:45	33:10	0,0
104T4I-10	14,68±0,64	2U	22:40	22:40	25:50	6,0
		1L	15:10	23:20	25:50	10,0
		3L	30:00	30:00	30:40	2,5
101T4I-20	21,94±2,05	1U	20:00	23:10	28:25	9,5
		3U	26:20	26:20	27:50	6,0
		2L	26:45	28:10	31:10	6,5
102T4I-20	20,28±2,18	2U	28:15	28:15	29:30	8,0
		1L	30:00	30:20	30:30	2,0
		3L	19:30	28:15	30:10	4,0

Effet de la température (T = -2°C)

N° d'essai	Intensité (g/dm ² h)	PLA. pos.	DÉBUT (min:sec)	FIE (min:sec)	MIT (min:sec)	PIL (cm/30min)
95T3I-0.3	0,44±0,06	1U	192:30	192:30	216:40	0,0
		3U	183:20	183:20	195:40	0,0
		2L	123:40	123:40	167:45	0,0
96T3I-0.3	0,49±0,02	2U	120:40	136:10	150:40	0,0
		1L	162:10	162:10	164:40	0,0
		3L	120:30	135:20	153:40	0,0
93T3I-1.4	1,60±0,17	1L	73:20	87:40	91:50	0,0
		3U	73:45	86:50	90:20	0,0
		2L	63:10	82:10	89:45	0,0
94T3I-1.4	1,62±0,06	2U	46:30	72:10	83:45	0,0
		1L	80:40	80:40	88:55	0,0
		3L	79:45	79:50	93:20	0,0
28T3I-2.5	2,92±0,32	1U	60:30	60:30	64:10	0,0
		3U	52:10	53:20	61:10	0,0
		2L	45:20	47:30	56:40	0,0
29T3I-2.5	2,97±0,35	2U	50:20	55:10	57:20	0,0
		1L	45:20	53:45	63:35	0,0
		3L	35:20	53:50	59:40	0,0
30T3I-5	5,29±0,11	1U	46:10	46:10	49:45	0,0
		3U	33:40	37:10	45:20	0,0
		2L	39:10	39:30	44:45	0,0
31T3I-5	5,45±0,12	1U	34:30	34:30	38:20	0,0
		1L	39:45	43:10	44:50	0,0
		3L	39:35	39:35	43:40	0,0
32T3I-10	12,87±0,94	1U	26:40	26:40	32:10	3,0
		3U	30:20	30:20	33:40	0,0
		2L	14:45	27:35	32:45	3,0
33T3I-10	15,28±0,85	2U	20:15	29:20	31:30	2,6
		1L	29:10	29:10	31:45	2,8
		3L	24:50	29:30	33:10	2,6
34T3I-20	22,58±1,62	1U	14:40	20:10	24:45	9,5
		3U	26:30	23:10	18:55	8,0
		2L	20:30	21:45	27:20	8,0
35T3I-20	24,37±0,71	2U	17:40	20:15	24:50	8,5
		1L	17:10	24:20	27:40	10,0
		3L	21:10	21:50	25:30	8,0

Effet de la température (T = -10°C)

N° d'essai	Intensité (g/dm ² h)	PLA. pos.	DÉBUT (min:sec)	FIE (min:sec)	MIT (min:sec)	PIL (cm/30min)
99T2I-0.3	0,92±0,10	1U	55:20	86:10	111:25	0,0
		3U	45:30	70:30	110:15	0,0
		2L	42:40	81:45	124:10	0,0
100T2I-0.3	1,02±0,04	2U	39:30	74:20	115:25	0,0
		1L	39:20	82:40	121:10	0,0
		3L	55:15	89:30	127:10	0,0
91T2I-1.4	1,88±0,21	1L	25:20	54:50	81:15	0,2
		3U	28:40	58:10	76:20	0,1
		2L	21:15	50:20	77:40	0,3
92T2I-1.4	1,90±0,05	2U	24:45	54:50	75:40	0,3
		1L	26:25	65:20	83:30	0,2
		3L	22:30	72:30	86:40	0,4
12T2I-2.5	3,38±0,35	1U	17:20	44:20	56:30	0,2
		3U	21:15	39:20	44:50	0,5
		2L	17:10	42:30	52:30	0,3
13T2I-2.5	3,37±0,21	2U	12:30	40:30	50:40	0,2
		1L	13:45	49:20	58:10	0,2
		3L	11:10	50:30	58:40	0,2
14T2I-5	5,89±0,24	1U	10:20	24:50	33:10	4,3
		3U	11:45	24:10	31:20	4,5
		2L	10:50	25:15	32:25	4,6
15T2I-5	5,97±0,17	2U	10:05	23:50	29:10	4,5
		1L	12:25	22:45	35:40	3,4
		3L	09:10	23:45	36:20	3,2
16T2I-10	13,45±1,00	1U	05:10	10:40	13:20	>30,0
		3U	03:20	11:20	14:10	>30,0
		2L	04:20	12:40	15:30	>30,0
17T2I-10	14,35±0,58	2U	04:15	11:10	13:30	>30,0
		1L	04:20	09:40	12:50	>30,0
		3L	03:45	13:25	16:45	>30,0
18T2I-20	20,90±2,10	1U	02:55	06:50	07:55	>30,0
		3U	04:20	06:40	06:50	>30,0
		2L	03:45	07:20	09:10	>30,0
19T2I-20	23,06±1,12	2U	02:15	04:20	05:40	>30,0
		1L	02:35	04:25	06:10	>30,0
		3L	04:15	04:25	06:30	>30,0

Effet de la température (T = -15°C)

N° d'essai	Intensité (g/dm ² h)	PLA. pos.	DÉBUT (min:sec)	FIE (min:sec)	MIT (min:sec)	PIL (cm/30min)
97T1I-0.3	1,29±0,10	1U	24:50	58:10	79:25	0,0
		3U	19:30	41:20	65:40	0,0
		2L	18:20	43:30	68:50	0,0
98T1I-0.3	1,05±0,60	2U	25:10	50:40	86:20	0,2
		1L	25:40	58:20	93:40	0,2
		3L	24:20	60:15	101:20	0,2
89T1I-1.4	1,93±0,26	1L	18:30	39:40	53:30	1,6
		3U	13:40	38:10	56:10	1,9
		2L	12:10	37:20	54:45	2,0
90T1I-1.4	2,00±0,08	2U	14:20	31:20	50:30	2,4
		1L	15:45	40:40	61:40	1,8
		3L	12:30	36:25	59:10	2,0
20T1I-2.5	3,47±0,45	1U	07:45	27:45	36:25	2,8
		3U	06:50	21:20	27:25	10,0
		2L	05:10	25:30	30:15	7,0
21T1I-2.5	3,47±0,15	2U	08:30	23:20	26:15	14,0
		1L	06:40	28:40	36:10	2,7
		3L	05:20	23:45	32:15	8,0
22T1I-5	6,00±0,37	1U	06:15	16:10	18:40	>30,0
		3U	07:45	15:10	16:50	>30,0
		2L	05:10	15:25	17:20	>30,0
23T1I-5	5,54±0,51	2U	04:50	15:50	17:40	>30,0
		1L	06:25	16:30	18:40	>30,0
		3L	05:40	19:25	24:40	>30,0
24T1I-10	13,78±0,96	1U	02:55	05:00	05:20	>30,0
		3U	02:10	05:00	05:20	>30,0
		2L	02:20	05:00	05:40	>30,0
25T1I-10	14,33±0,54	2U	03:05	04:20	04:45	>30,0
		1L	03:30	04:45	05:20	>30,0
		3L	03:30	06:55	08:30	>30,0
26T1I-20	23,33±1,90	1U	02:10	02:20	02:55	>30,0
		3U	01:30	02:20	02:45	>30,0
		2L	01:50	02:20	02:40	>30,0
27T1I-20	23,45±1,86	2U	01:30	01:35	01:40	>30,0
		1L	01:40	01:50	02:30	>30,0
		3L	02:30	02:40	02:50	>30,0

ANNEXE B

Observations des temps de protection sur l'effet de l'inclinaison à la température -5°C

N° d'essai	Intensité (g/dm ² h)	PAL. pos.	DÉBUT (min:sec)	FIE (min:sec)	MIT (min:sec)	PIL (cm/30min)
38β-2,5	6,32±0,43	1U	110:30	163:40	176:10	0,0
		3U	112:50	166:20	178:50	0,0
		2L	85:40	171:40	184:10	0,0
39β-2,5	6,37±0,17	2U	124:10	142:40	154:20	0,0
		1L	98:30	159:40	173:20	0,0
		3L	87:40	165:20	172:40	0,0
40β-5	6,67±0,32	1L	32:40	72:50	84:20	0,2
		3U	31:20	76:20	87:10	0,3
		2L	22:10	70:10	81:30	0,5
41β-5	6,28±0,12	2U	34:20	73:20	84:30	0,0
		1L	30:30	85:40	95:45	0,0
		3L	28:10	84:10	95:20	0,0
1I-5(β-10)	4,98±0,34	1U	22:50	35:00	37:25	1,1
		3U	17:15	38:50	40:30	1,5
		2L	16:30	36:10	37:45	1,3
2I-5(β-10)	5,69±0,25	2U	26:55	30:20	35:15	2,5
		1L	23:30	31:50	34:30	2,4
		3L	12:30	35:30	36:10	2,0
42β-15	5,65±0,36	1U	18:30	24:10	29:50	6,5
		3U	19:10	29:35	32:10	4,0
		2L	20:15	24:40	32:10	7,5
43β-15	5,65±0,41	1U	15:50	25:30	28:40	7,2
		1L	18:20	25:40	29:30	6,8
		3L	14:45	26:10	31:30	6,5
44β-20	5,84±0,66	1U	09:20	18:15	21:10	17,0
		3U	14:10	18:50	21:20	13,0
		2L	15:05	18:40	21:30	15,0
45β-20	6,35±0,45	2U	09:10	16:45	19:50	14,0
		1L	12:05	19:40	22:45	12,0
		3L	08:30	21:05	24:25	10,0

ANNEXE C

Observations des temps de protection sur l'effet de la courbure à la température -5°C pour une inclinaison de la plaque à 10°

N° de l'essai	Intensité (g/dm ² h)	PLA. pos.	DÉBUT (min:sec)	FIE (min:sec)	MIT (min:sec)	PIL (cm/30min)
2I-5	5,69±0,25	2U	26:55	30:20	35:15	2,5
		1L	23:30	31:50	34:30	2,4
		3L	12:30	35:30	36:10	2,0
46I2R-1	5,33±0,06	1U	15:15	35:10	35:30	1,8
		3U	21:50	31:40	34:45	2,3
		2L	20:40	29:10	33:10	2,7
121I2R-2	5,55±0,13	2U	25:40	32:15	33:50	4,0
		1L	14:30	28:15	30:30	5,0
		3L	18:40	31:20	33:15	5,0
11I-20	23,63±0,98	2U	06:30	11:45	14:45	>30,0
		1L	07:20	12:30	14:50	>30,0
		3L	08:20	13:50	16:40	>30,0
120I4R-1	19,75±0,44	2U	05:20	10:50	13:45	>30,0
		1L	12:20	12:20	15:40	>30,0
		3L	09:20	12:45	16:20	>30,0
49I4R-2	19,83±0,71	2U	06:50	12:40	15:45	>30,0
		1L	07:30	13:20	16:50	>30,0
		3L	10:40	13:45	16:25	>30,0

ANNEXE D

Le code source du programme de simulation modèle 1

```

#include <stdio.h>
#define STOP 300

main ()
{
    FILE *in,*out;
    int i,tl,j,m,n,k,count,ch,Tl,p,q,l,g;
    char filename1[20],filename2[20];
    float thickness[STOP],Density[STOP],Dilution[STOP], Thickness[STOP];
    float average[STOP],h1[STOP],h3[STOP],H[STOP];
    float c1[STOP],c0[STOP],delta[STOP];
    float sum,sx,sy,sxx,sxy,minimum, density,dilution, I, delta_t,t,temp;

/* 1.0 ENTREE LE FICHIER D'EPAISSEUR DU FLUIDE MESURE EN CONDITION DES
   PRECIPITATIONS */

printf("Enter a thickness file name:");
gets(filename1);

i=0;
if ( (in=fopen(filename1,"r")) !=NULL)
{
    while (fscanf(in,"%f",&thickness[i]) != EOF)
        i++;
    k=i;
    fclose(in);
}
else
    printf("I coundn't open the file %s\n", filename1);
for (i=0; i< k; i++)
    printf("%10.5f ", thickness[i]);
printf("\n");

/* 2.0 LISSAGE DES EPAISSEURS MESUREES EN FONCTION DU TEMPS AVEC DEUX
   EQUATIONS SIMPLES*/

printf("how long do you take to measure the thickness(in minute)\n");
scanf("%f",&temp);

```

```

printf("\n");

for(count=0,tl=2;tl<temp;tl=tl+2,count++)
{
    for(j=0,sum=0;j<=tl/2;j++)
    {
        sum+=thickness[j];
        average[count]=sum/(tl/2+1);
        h1[count]=average[count];

    }
    printf("h1[%d]=%f\n",h1[count]);
    printf("\n");
    for(j=tl/2,sx=0,sy=0,sxx=0,sxy=0;j<k;j++)
    {
        n=(k-tl/2);
        sx+=2*j;
        sy+=thickness[j];
        sxx+=(2*j)*(2*j);
        sxy+=(2*j)*thickness[j];

        c1[count]=(n*sxy-sx*sy)/(n*sxx-sx*sx);
        c0[count]=(sy*sxx-sx*sxy)/(n*sxx-sx*sx);
        h3[count]=c0[count]+c1[count]*tl;

    }
    printf("count=%3d c1[%d]=%3f c0[%d]=%3f\n",count,c1[count],c0[count]);
    printf("h2(t)=c0+c1*t\n");
    printf("h3[%d]=c0[%d]+c1[%d]*t\n");
    printf("h3[%d]=%3f\n",h3[count]);
    H[count]=h3[count]-h1[count];
    delta[count]=abs(H[count]);
    printf("H[%d]=%3f delta[%d]=%3f\n",H[count],delta[count]);
    g=count;
    printf("tl=%d\n", tl);
}

for(minimum=delta[0],tl=2,l=0;l<=g;tl=tl+2,l++)
{
    if(delta[l]<minimum)
    {
        minimum=delta[l];
        m=l;
        Tl=tl;
    }
}
printf("the minimum is %3f count is %3d\n",minimum,m);

printf("count=%3d Tl=%3d minimum=%3f c1[%d]=%3f c0[%d]=%3f m=%d h1[%d]=%3f\n",m, Tl,
minimum, c1[m], c0[m], m, h1[m]);
printf("\n");

```

/* 3.0 ENTREE DES VARIABLES DE DEPART */

```
printf("please give the initial density\n");
scanf("%f",&density);
printf("please give the initial dilution\n");
scanf("%f",&dilution);
printf("please give the rate of precipitation(I) in g/dm2h\n");
scanf("%f",&I);
printf("please give the interval time(delta_t) in second\n");
scanf("%f",&delta_t);
printf("please give the time(t)(in minute) to know the dilution values\n");
scanf("%f",&t);
printf("%f %f %f\n",h1[m],c0[m],c1[m]);
Density[0]=density;
Dilution[0]=dilution;
```

/* 4.0 CALCUL LA DENSITE ET LA DILUTION DU FLUIDE EN FONCTION DU TEMPS */

```
Thickness[0]=h1[m];
for(p=1; p<=60*t/delta_t; p++)
{
    if(p<=60*Tl/delta_t)
    {
        density=density+(I*(1-density)*delta_t)/(36.0*h1[m]);
        dilution=dilution+(I*(1-dilution)*delta_t)/(36.0*density*h1[m]);
        Density[p]=density;
        Dilution[p]=dilution;
        Thickness[p]=h1[m];
    }
    else
    {
        density=density+(I*(1-density)*delta_t)/(36.0*(c0[m]+c1[m]*(float)p*delta_t/60.0));
        dilution=dilution+(I*(1-dilution)*delta_t)/(36.0*(c0[m]+c1[m]*(float)p*delta_t/60.0)*density);
        Density[p]=density;
        Dilution[p]=dilution;
        Thickness[p]=(c0[m]+c1[m]*(float)p*delta_t/60.0);

    }
    if (dilution>1) break;
    q=p;
}
for(p=0; p<=q; p++)
printf("%5d %10.5f %10.5f %10.5f %10.5f\n", p, p*delta_t/60,Thickness[p], Density[p], Dilution[p]);
```

```
/* 5.0 FICHIER DE SORTIE */

printf("please entre a file name for output the resulte:");
scanf("%s",filename2);

p=0;
if ( (out=fopen(filename2,"w") ) !=NULL)
{
    fprintf(out," n time(min) thickness(micron) density dilution \n");
    while (p<=60*t/delta_t)
    {
        fprintf(out, "%5d %10.5f %15.5f %14.5f %10.5f\n",p, p*delta_t/60,
Thickness[p], Density[p], Dilution[p]);
        p++;
    }

    fclose(out);
}
else
printf("can't open the output file\n",filename2);

}

/* FONCTION DE LA VALEUR ABSOLUE */

abs(x)
float x;
{
    float y;
    y=(x<0) ? -x:x;
    return y;
}
```

ANNEXE E

Les résultats calculés par le modèle 1

Enter a thickness file name:thickness3-type2

483.00000 432.00000 432.00000 432.00000 381.00000 432.00000 432.00000 381.00000 483.00000
 483.00000 483.00000 483.00000 483.00000 432.00000 381.00000 331.00000 242.00000 191.00000
 115.00000

how long do you take to measure the thickness(in minute)

36

please give the initial density

1.08

please give the initial dilution

0.43

please give the rate of precipitation(I) in g/dm²h

5.22

please give the interval time(delta_t) in second

20

please give the time(t)(in minute) to know the dilution values

39

n	time(min)	thickness(micron)	density	dilution
0	0.00000	446.57144	1.08000	0.43000
1	0.33333	446.57144	1.07948	0.43343
2	0.66667	446.57144	1.07896	0.43684
3	1.00000	446.57144	1.07845	0.44023
4	1.33333	446.57144	1.07794	0.44360
5	1.66667	446.57144	1.07744	0.44696
6	2.00000	446.57144	1.07693	0.45029
7	2.33333	446.57144	1.07643	0.45361
8	2.66667	446.57144	1.07594	0.45690
9	3.00000	446.57144	1.07544	0.46018
10	3.33333	446.57144	1.07495	0.46345
11	3.66667	446.57144	1.07447	0.46669
12	4.00000	446.57144	1.07398	0.46991
13	4.33333	446.57144	1.07350	0.47312
14	4.66667	446.57144	1.07303	0.47631
15	5.00000	446.57144	1.07255	0.47948
16	5.33333	446.57144	1.07208	0.48263
17	5.66667	446.57144	1.07161	0.48577
18	6.00000	446.57144	1.07115	0.48888
19	6.33333	446.57144	1.07069	0.49198
20	6.66667	446.57144	1.07023	0.49507
21	7.00000	446.57144	1.06977	0.49813
22	7.33333	446.57144	1.06932	0.50118
23	7.66667	446.57144	1.06887	0.50421
24	8.00000	446.57144	1.06842	0.50722
25	8.33333	446.57144	1.06798	0.51022
26	8.66667	446.57144	1.06753	0.51320
27	9.00000	446.57144	1.06710	0.51616
28	9.33333	446.57144	1.06666	0.51911
29	9.66667	446.57144	1.06623	0.52204
30	10.00000	446.57144	1.06580	0.52495

31	10.33333	446.57144	1.06537	0.52784
32	10.66667	446.57144	1.06494	0.53072
33	11.00000	446.57144	1.06452	0.53359
34	11.33333	446.57144	1.06410	0.53643
35	11.66667	446.57144	1.06369	0.53926
36	12.00000	446.57144	1.06327	0.54208
37	12.33333	446.57144	1.06286	0.54488
38	12.66667	446.57144	1.06246	0.54766
39	13.00000	446.57144	1.06205	0.55042
40	13.33333	446.57144	1.06165	0.55317
41	13.66667	446.57144	1.06125	0.55591
42	14.00000	446.57144	1.06085	0.55863
43	14.33333	446.57144	1.06045	0.56133
44	14.66667	446.57144	1.06006	0.56402
45	15.00000	446.57144	1.05967	0.56669
46	15.33333	446.57144	1.05928	0.56934
47	15.66667	446.57144	1.05890	0.57198
48	16.00000	446.57144	1.05852	0.57461
49	16.33333	446.57144	1.05814	0.57722
50	16.66667	446.57144	1.05776	0.57982
51	17.00000	446.57144	1.05738	0.58240
52	17.33333	446.57144	1.05701	0.58496
53	17.66667	446.57144	1.05664	0.58751
54	18.00000	446.57144	1.05627	0.59005
55	18.33333	446.57144	1.05591	0.59257
56	18.66667	446.57144	1.05554	0.59508
57	19.00000	446.57144	1.05518	0.59757
58	19.33333	446.57144	1.05483	0.60005
59	19.66667	446.57144	1.05447	0.60251
60	20.00000	446.57144	1.05412	0.60496
61	20.33333	446.57144	1.05376	0.60739
62	20.66667	446.57144	1.05341	0.60981
63	21.00000	446.57144	1.05307	0.61222
64	21.33333	446.57144	1.05272	0.61461
65	21.66667	446.57144	1.05238	0.61699
66	22.00000	446.57144	1.05204	0.61935
67	22.33333	446.57144	1.05170	0.62170
68	22.66667	446.57144	1.05137	0.62404
69	23.00000	446.57144	1.05103	0.62636
70	23.33333	446.57144	1.05070	0.62867
71	23.66667	446.57144	1.05037	0.63097
72	24.00000	446.57144	1.05005	0.63325
73	24.33333	446.57144	1.04972	0.63552
74	24.66667	446.57144	1.04940	0.63778
75	25.00000	446.57144	1.04908	0.64002
76	25.33333	446.57144	1.04876	0.64225
77	25.66667	446.57144	1.04844	0.64446
78	26.00000	446.57144	1.04813	0.64667
79	26.33333	431.60004	1.04780	0.64893
80	26.66667	420.91431	1.04747	0.65124
81	27.00000	410.22858	1.04714	0.65360
82	27.33333	399.54288	1.04680	0.65600
83	27.66667	388.85718	1.04645	0.65845

84	28.00000	378.17145	1.04609	0.66095
85	28.33333	367.48572	1.04573	0.66351
86	28.66667	356.80002	1.04536	0.66613
87	29.00000	346.11432	1.04498	0.66880
88	29.33333	335.42859	1.04459	0.67155
89	29.66667	324.74286	1.04419	0.67435
90	30.00000	314.05716	1.04378	0.67724
91	30.33333	303.37146	1.04336	0.68019
92	30.66667	292.68573	1.04293	0.68323
93	31.00000	282.00000	1.04249	0.68636
94	31.33333	271.31430	1.04204	0.68957
95	31.66667	260.62860	1.04157	0.69289
96	32.00000	249.94287	1.04109	0.69631
97	32.33333	239.25716	1.04059	0.69985
98	32.66667	228.57144	1.04007	0.70351
99	33.00000	217.88573	1.03954	0.70731
100	33.33333	207.20001	1.03899	0.71125
101	33.66667	196.51430	1.03841	0.71535
102	34.00000	185.82858	1.03781	0.71963
103	34.33333	175.14287	1.03719	0.72411
104	34.66667	164.45715	1.03653	0.72880
105	35.00000	153.77144	1.03584	0.73374
106	35.33333	143.08572	1.03512	0.73895
107	35.66667	132.40001	1.03435	0.74448
108	36.00000	121.71429	1.03353	0.75037
109	36.33333	111.02858	1.03265	0.75669
110	36.66667	100.34286	1.03171	0.76350
111	37.00000	89.65715	1.03068	0.77092
112	37.33333	78.97144	1.02956	0.77909
113	37.66667	68.28572	1.02830	0.78822
114	38.00000	57.60001	1.02688	0.79860
115	38.33333	46.91429	1.02521	0.81074
116	38.66667	36.22858	1.02320	0.82555
117	39.00000	25.54286	1.02056	0.84496

Enter a thickness file name:thickness2-type2

483.00000 432.00000 483.00000 483.00000 432.00000 432.00000 432.00000 432.00000 432.00000
483.00000 483.00000 483.00000 483.00000 432.00000 432.00000 331.00000 242.00000 191.00000

how long do you take to measure the thickness(in minute)

40

please give the initial density

1.08

please give the initial dilution

0.43

please give the rate of precipitation(I) in g/dm²h

5.53

please give the interval time(delta_t) in second

20

please give the time(t)(in minute) to know the dilution values

40

n	time(min)	thickness(micron)	density	dilution
0	0.00000	457.50000	1.08000	0.43000
1	0.33333	457.50000	1.07946	0.43355
2	0.66667	457.50000	1.07893	0.43707
3	1.00000	457.50000	1.07840	0.44058
4	1.33333	457.50000	1.07787	0.44406
5	1.66667	457.50000	1.07735	0.44753
6	2.00000	457.50000	1.07683	0.45097
7	2.33333	457.50000	1.07631	0.45440
8	2.66667	457.50000	1.07580	0.45780
9	3.00000	457.50000	1.07529	0.46119
10	3.33333	457.50000	1.07479	0.46456
11	3.66667	457.50000	1.07429	0.46790
12	4.00000	457.50000	1.07379	0.47123
13	4.33333	457.50000	1.07329	0.47454
14	4.66667	457.50000	1.07280	0.47783
15	5.00000	457.50000	1.07231	0.48110
16	5.33333	457.50000	1.07182	0.48435
17	5.66667	457.50000	1.07134	0.48758
18	6.00000	457.50000	1.07086	0.49080
19	6.33333	457.50000	1.07039	0.49399
20	6.66667	457.50000	1.06991	0.49717
21	7.00000	457.50000	1.06944	0.50032
22	7.33333	457.50000	1.06898	0.50346
23	7.66667	457.50000	1.06852	0.50658
24	8.00000	457.50000	1.06806	0.50968
25	8.33333	457.50000	1.06760	0.51277
26	8.66667	457.50000	1.06714	0.51583
27	9.00000	457.50000	1.06669	0.51888
28	9.33333	457.50000	1.06625	0.52191
29	9.66667	457.50000	1.06580	0.52493
30	10.00000	457.50000	1.06536	0.52792
31	10.33333	457.50000	1.06492	0.53090
32	10.66667	457.50000	1.06448	0.53386

33	11.00000	457.50000	1.06405	0.53680
34	11.33333	457.50000	1.06362	0.53972
35	11.66667	457.50000	1.06319	0.54263
36	12.00000	457.50000	1.06277	0.54552
37	12.33333	457.50000	1.06235	0.54839
38	12.66667	457.50000	1.06193	0.55125
39	13.00000	457.50000	1.06151	0.55409
40	13.33333	457.50000	1.06110	0.55691
41	13.66667	457.50000	1.06069	0.55971
42	14.00000	457.50000	1.06028	0.56250
43	14.33333	457.50000	1.05988	0.56527
44	14.66667	457.50000	1.05947	0.56803
45	15.00000	457.50000	1.05908	0.57077
46	15.33333	457.50000	1.05868	0.57349
47	15.66667	457.50000	1.05828	0.57620
48	16.00000	457.50000	1.05789	0.57889
49	16.33333	457.50000	1.05750	0.58156
50	16.66667	457.50000	1.05712	0.58422
51	17.00000	457.50000	1.05674	0.58686
52	17.33333	457.50000	1.05635	0.58949
53	17.66667	457.50000	1.05598	0.59210
54	18.00000	457.50000	1.05560	0.59469
55	18.33333	457.50000	1.05523	0.59727
56	18.66667	457.50000	1.05486	0.59984
57	19.00000	457.50000	1.05449	0.60239
58	19.33333	457.50000	1.05412	0.60492
59	19.66667	457.50000	1.05376	0.60744
60	20.00000	457.50000	1.05340	0.60994
61	20.33333	457.50000	1.05304	0.61243
62	20.66667	457.50000	1.05268	0.61490
63	21.00000	457.50000	1.05233	0.61736
64	21.33333	457.50000	1.05198	0.61980
65	21.66667	457.50000	1.05163	0.62223
66	22.00000	457.50000	1.05128	0.62464
67	22.33333	457.50000	1.05094	0.62704
68	22.66667	457.50000	1.05059	0.62942
69	23.00000	457.50000	1.05025	0.63179
70	23.33333	457.50000	1.04992	0.63415
71	23.66667	457.50000	1.04958	0.63649
72	24.00000	457.50000	1.04925	0.63881
73	24.33333	457.50000	1.04892	0.64113
74	24.66667	457.50000	1.04859	0.64342
75	25.00000	457.50000	1.04826	0.64571
76	25.33333	457.50000	1.04794	0.64798
77	25.66667	457.50000	1.04762	0.65024
78	26.00000	457.50000	1.04730	0.65248
79	26.33333	448.80002	1.04697	0.65475
80	26.66667	437.60001	1.04664	0.65707
81	27.00000	426.40002	1.04631	0.65943
82	27.33333	415.20001	1.04597	0.66184
83	27.66667	404.00003	1.04562	0.66430
84	28.00000	392.80002	1.04526	0.66681
85	28.33333	381.60001	1.04490	0.66938

86	28.66667	370.40002	1.04452	0.67200
87	29.00000	359.20001	1.04414	0.67469
88	29.33333	348.00003	1.04375	0.67744
89	29.66667	336.80002	1.04335	0.68026
90	30.00000	325.60004	1.04294	0.68315
91	30.33333	314.40002	1.04252	0.68612
92	30.66667	303.20001	1.04209	0.68917
93	31.00000	292.00003	1.04165	0.69231
94	31.33333	280.80002	1.04119	0.69555
95	31.66667	269.60004	1.04073	0.69888
96	32.00000	258.40002	1.04024	0.70232
97	32.33333	247.20003	1.03974	0.70588
98	32.66667	236.00003	1.03922	0.70956
99	33.00000	224.80002	1.03869	0.71339
100	33.33333	213.60002	1.03813	0.71736
101	33.66667	202.40002	1.03755	0.72149
102	34.00000	191.20003	1.03695	0.72581
103	34.33333	180.00003	1.03632	0.73032
104	34.66667	168.80003	1.03566	0.73506
105	35.00000	157.60004	1.03496	0.74005
106	35.33333	146.40002	1.03423	0.74533
107	35.66667	135.20003	1.03345	0.75093
108	36.00000	124.00003	1.03262	0.75690
109	36.33333	112.80003	1.03173	0.76332
110	36.66667	101.60003	1.03077	0.77026
111	37.00000	90.40003	1.02973	0.77785
112	37.33333	79.20004	1.02857	0.78622
113	37.66667	68.00003	1.02728	0.79563
114	38.00000	56.80003	1.02581	0.80640
115	38.33333	45.60003	1.02407	0.81914
116	38.66667	34.40004	1.02192	0.83494

Enter a thickness file name:thickness1-type2

432.00000 432.00000 381.00000 381.00000 381.00000 432.00000 432.00000 432.00000 381.00000
381.00000 483.00000 432.00000 432.00000 381.00000 381.00000 331.00000 166.00000

how long do you take to measure the thickness(in minute)

38

please give the initial density

1.08

please give the initial dilution

0.43

please give the rate of precipitation(I) in g/dm²h

5.64

please give the interval time(delta_t) in second

20

please give the time(t)(in minute) to know the dilution values

37

n	time(min)	thickness(micron)	density	dilution
0	0.00000	413.78571	1.08000	0.43000
1	0.33333	413.78571	1.07939	0.43400
2	0.66667	413.78571	1.07879	0.43797
3	1.00000	413.78571	1.07820	0.44192
4	1.33333	413.78571	1.07760	0.44584
5	1.66667	413.78571	1.07702	0.44974
6	2.00000	413.78571	1.07643	0.45361
7	2.33333	413.78571	1.07585	0.45745
8	2.66667	413.78571	1.07528	0.46127
9	3.00000	413.78571	1.07471	0.46507
10	3.33333	413.78571	1.07414	0.46884
11	3.66667	413.78571	1.07358	0.47259
12	4.00000	413.78571	1.07303	0.47631
13	4.33333	413.78571	1.07247	0.48001
14	4.66667	413.78571	1.07192	0.48368
15	5.00000	413.78571	1.07138	0.48733
16	5.33333	413.78571	1.07084	0.49096
17	5.66667	413.78571	1.07030	0.49456
18	6.00000	413.78571	1.06977	0.49813
19	6.33333	413.78571	1.06924	0.50169
20	6.66667	413.78571	1.06872	0.50522
21	7.00000	413.78571	1.06820	0.50873
22	7.33333	413.78571	1.06768	0.51221
23	7.66667	413.78571	1.06717	0.51567
24	8.00000	413.78571	1.06666	0.51911
25	8.33333	413.78571	1.06615	0.52253
26	8.66667	413.78571	1.06565	0.52592
27	9.00000	413.78571	1.06516	0.52929
28	9.33333	413.78571	1.06466	0.53264
29	9.66667	413.78571	1.06417	0.53596
30	10.00000	413.78571	1.06369	0.53927
31	10.33333	413.78571	1.06321	0.54255
32	10.66667	413.78571	1.06273	0.54581

33	11.00000	413.78571	1.06225	0.54904
34	11.33333	413.78571	1.06178	0.55226
35	11.66667	413.78571	1.06131	0.55546
36	12.00000	413.78571	1.06085	0.55863
37	12.33333	413.78571	1.06039	0.56178
38	12.66667	413.78571	1.05993	0.56491
39	13.00000	413.78571	1.05948	0.56802
40	13.33333	413.78571	1.05903	0.57111
41	13.66667	413.78571	1.05858	0.57418
42	14.00000	413.78571	1.05814	0.57723
43	14.33333	413.78571	1.05770	0.58025
44	14.66667	413.78571	1.05726	0.58326
45	15.00000	413.78571	1.05682	0.58624
46	15.33333	413.78571	1.05639	0.58921
47	15.66667	413.78571	1.05597	0.59216
48	16.00000	413.78571	1.05554	0.59508
49	16.33333	413.78571	1.05512	0.59799
50	16.66667	413.78571	1.05471	0.60087
51	17.00000	413.78571	1.05429	0.60374
52	17.33333	413.78571	1.05388	0.60659
53	17.66667	413.78571	1.05347	0.60942
54	18.00000	413.78571	1.05307	0.61222
55	18.33333	413.78571	1.05267	0.61501
56	18.66667	413.78571	1.05227	0.61778
57	19.00000	413.78571	1.05187	0.62054
58	19.33333	413.78571	1.05148	0.62327
59	19.66667	413.78571	1.05109	0.62598
60	20.00000	413.78571	1.05070	0.62868
61	20.33333	413.78571	1.05032	0.63136
62	20.66667	413.78571	1.04994	0.63401
63	21.00000	413.78571	1.04956	0.63665
64	21.33333	413.78571	1.04918	0.63928
65	21.66667	413.78571	1.04881	0.64188
66	22.00000	413.78571	1.04844	0.64447
67	22.33333	413.78571	1.04807	0.64704
68	22.66667	413.78571	1.04771	0.64959
69	23.00000	413.78571	1.04735	0.65212
70	23.33333	413.78571	1.04699	0.65464
71	23.66667	413.78571	1.04663	0.65714
72	24.00000	413.78571	1.04628	0.65962
73	24.33333	413.78571	1.04593	0.66208
74	24.66667	413.78571	1.04558	0.66453
75	25.00000	413.78571	1.04524	0.66696
76	25.33333	413.78571	1.04490	0.66937
77	25.66667	413.78571	1.04456	0.67177
78	26.00000	413.78571	1.04422	0.67415
79	26.33333	407.41666	1.04388	0.67655
80	26.66667	395.83334	1.04353	0.67900
81	27.00000	384.25000	1.04318	0.68151
82	27.33333	372.66666	1.04281	0.68408
83	27.66667	361.08334	1.04244	0.68671
84	28.00000	349.50000	1.04206	0.68941
85	28.33333	337.91666	1.04167	0.69217

86	28.66667	326.33334	1.04127	0.69501
87	29.00000	314.75000	1.04086	0.69793
88	29.33333	303.16666	1.04044	0.70093
89	29.66667	291.58334	1.04000	0.70402
90	30.00000	280.00000	1.03956	0.70720
91	30.33333	268.41666	1.03909	0.71049
92	30.66667	256.83334	1.03862	0.71389
93	31.00000	245.25000	1.03812	0.71741
94	31.33333	233.66667	1.03761	0.72107
95	31.66667	222.08333	1.03708	0.72486
96	32.00000	210.50000	1.03653	0.72881
97	32.33333	198.91667	1.03595	0.73294
98	32.66667	187.33333	1.03535	0.73725
99	33.00000	175.75000	1.03472	0.74178
100	33.33333	164.16667	1.03406	0.74654
101	33.66667	152.58333	1.03336	0.75158
102	34.00000	141.00000	1.03262	0.75693
103	34.33333	129.41667	1.03183	0.76263
104	34.66667	117.83334	1.03098	0.76875
105	35.00000	106.25000	1.03007	0.77537
106	35.33333	94.66666	1.02907	0.78260
107	35.66667	83.08334	1.02798	0.79057
108	36.00000	71.50000	1.02675	0.79951
109	36.33333	59.91667	1.02535	0.80974
110	36.66667	48.33333	1.02371	0.82179
111	37.00000	36.75000	1.02169	0.83666

ANNEXE F

Le code source du programme de simulation modèle 2

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#define STOP 1000

main ()
{
    FILE *in,*out;
    int i, n, m;
    char filename[20];
    float Density[STOP],Dilution[STOP],th_0[STOP],d0[STOP], tau[STOP], Thickness[STOP];
    float density, dilution, I, dmax, tau_1, a, thickness, delta_t, te, temp,x,b,c,y;
```

/* 1.1 ENTREE LE FICHIER DE LA DILUTION */

```

printf("Enter a file name of dilution used:");
gets(filename);
    i=0;
    if ( (in=fopen(filename,"r") ) !=NULL)
    {
        while (fscanf(in,"%f",&d0[i]) != EOF)
            i++;
        fclose(in);
    }
else
    printf("I coundn't open the file %s\n", fi

```

/* 1.2 ENTREE LE FICHIER D'EPATIEUR INITIALE CORRESPONDANT A CHAQUE
DILUTION */

```
printf("Enter a file name of th_0:");
gets(filename);
    i=0;
    if ( (in=fopen(filename,"r") ) !=NULL)
    {
        while (fscanf(in,"%f",&th_0[i]) !=EOF)
```

```

        i++;

        fclose(in);
    }
else
    printf("I coundn't open the file %s\n", filename);

/* 1.3 ENTREE LE FICHIER DE PARAMETRES CORRESPONDANT A CHAQUE DILUTION */

printf("Enter a file name of tau:");
gets(filename);
i=0;
if ( (in=fopen(filename,"r")) !=NULL )
{
    while (fscanf(in,"%f",&tau[i]) != EOF)
        i++;

    fclose(in);
}
else
    printf("I coundn't open the file %s\n", filename);
printf("\n");

/* 2.0 ENTREE DES VARIABLES DE DEPART */

printf("please give the initial density\n");
scanf("%f",&density);
printf("please give the initial dilution\n");
scanf("%f",&dilution);
printf("please give the rate of precipitation(I) in g/dm2h\n");
scanf("%f",&I);
printf("please give the interval time(delta_t) in second\n");
scanf("%f",&delta_t);
printf("please give the max dilution\n");
scanf("%f",&dmax);
printf("please give the time(temp) in minute to know the dilution values\n");
scanf("%f",&temp);

/* 3.0 CALCUL LA DENSITE ET LA DILUTION DU FLUIDE EN FONCTION DU TEMPS */

Density[0]=density;
Dilution[0]=dilution;
n=1;

te=0;
x=-(te+delta_t/60.0)/tau[0];
thickness=th_0[0]*exp(x);
Thickness[n]=thickness;
density=density+(I*(1-density)*delta_t)/(36.0*thickness);
dilution=dilution+(I*(1-dilution)*delta_t)/(36.0*thickness*density);
Density[n]=density;

```

```

Dilution[n]=dilution;
a=(th_0[0]*(dilution-d0[1])+th_0[1]*(d0[0]-dilution))/(d0[0]-d0[1]);
tau_1=(tau[0]*(dilution-d0[1])+tau[1]*(d0[0]-dilution))/(d0[0]-d0[1]);
te=-tau_1*log(thickness/a);

for(n=2; n<=60*temp/delta_t;n++)
{
if (dilution<=d0[1])
{
    thickness=a*exp(-(te+delta_t/60.0)/tau_1);
    Thickness[n]=thickness;
    density=density+(I*(1-density)*delta_t)/(36.0*thickness);
    dilution=dilution+(I*(1-dilution)*delta_t)/(36.0*thickness*density);
    Density[n]=density;
    Dilution[n]=dilution;
    {
        if (dilution>d0[1])
        {
            a=(th_0[1]*(dilution-d0[2])+th_0[2]*(d0[1]-dilution))/(d0[1]-d0[2]);
            tau_1=(tau[1]*(dilution-d0[2])+tau[2]*(d0[1]-dilution))/(d0[1]-d0[2]);
            te=-tau_1*log(thickness/a);
        }
        else
        {
            a=(th_0[0]*(dilution-d0[1])+th_0[1]*(d0[0]-dilution))/(d0[0]-d0[1]);
            tau_1=(tau[0]*(dilution-d0[1])+tau[1]*(d0[0]-dilution))/(d0[0]-d0[1]);
            te=-tau_1*log(thickness/a);
        }
    }
}
}

else if (dilution<=d0[2])
{
    thickness=a*exp(-(te+delta_t/60.0)/tau_1);
    Thickness[n]=thickness;
    density=density+(I*(1-density)*delta_t)/(36.0*thickness);
    dilution=dilution+(I*(1-dilution)*delta_t)/(36*thickness*density);
    Density[n]=density;
    Dilution[n]=dilution;
    {
        if (dilution>d0[2])
        {
            a=(th_0[2]*(dilution-d0[3])+th_0[3]*(d0[2]-dilution))/(d0[2]-d0[3]);
            tau_1=(tau[2]*(dilution-d0[3])+tau[3]*(d0[2]-dilution))/(d0[2]-d0[3]);
            te=-tau_1*log(thickness/a);
        }
        else
        {
            a=(th_0[1]*(dilution-d0[2])+th_0[2]*(d0[1]-dilution))/(d0[1]-d0[2]);
            tau_1=(tau[1]*(dilution-d0[2])+tau[2]*(d0[1]-dilution))/(d0[1]-d0[2]);
            te=-tau_1*log(thickness/a);
        }
    }
}
}

```

```

}

else if (dilution<=d0[3])
{
    thickness=a*exp(-(te+delta_t/60.0)/tau_1);
    Thickness[n]=thickness;
    density=density+(I*(1-density)*delta_t)/(36.0*thickness);
    dilution=dilution+(I*(1-dilution)*delta_t)/(36.0*thickness*density);
    Density[n]=density;
    Dilution[n]=dilution;
    {
        if (dilution>d0[3])
        {
            a=(th_0[3]*(dilution-d0[4])+th_0[4]*(d0[3]-dilution))/(d0[3]-d0[4]);
            tau_1=(tau[3]*(dilution-d0[4])+tau[4]*(d0[3]-dilution))/(d0[3]-d0[4]);
            te=-tau_1*log(thickness/a);
        }
        else
        {
            a=(th_0[2]*(dilution-d0[3])+th_0[3]*(d0[2]-dilution))/(d0[2]-d0[3]);
            tau_1=(tau[2]*(dilution-d0[3])+tau[3]*(d0[2]-dilution))/(d0[2]-d0[3]);
            te=-tau_1*log(thickness/a);
        }
    }
}

else if (dilution<=d0[4])
{
    thickness=a*exp(-(te+delta_t/60.0)/tau_1);
    Thickness[n]=thickness;
    density=density+(I*(1-density)*delta_t)/(36.0*thickness);
    dilution=dilution+(I*(1-dilution)*delta_t)/(36.0*thickness*density);
    Density[n]=density;
    Dilution[n]=dilution;
    a=(th_0[3]*(dilution-d0[4])+th_0[4]*(d0[3]-dilution))/(d0[3]-d0[4]);
    tau_1=(tau[3]*(dilution-d0[4])+tau[4]*(d0[3]-dilution))/(d0[3]-d0[4]);
    te=-tau_1*log(thickness/a);

}
m=n;
if (dilution>dmax) break;

}
Thickness[0]=th_0[0];
for (n=0; n<=m;n++)
    printf("%5d %10.5f %10.5f %10.5f %10.5f\n", n, n*delta_t/60, Thickness[n], Density[n],
Dilution[n]);

/* 4.0 FICHIER DE SORTIE */

printf("please entre a file name for output the resulte:");

```

```
scanf("%s",filename);
n=0;
if ( (out=fopen(filename,"w") ) !=NULL)
{
    fprintf(out," n time(min) thickness(micron) density dilution \n");
    while (n<=m)
    {
        fprintf(out, "%5d %10.5f %15.5f %14.5f %10.5f\n",n, n*delta_t/60, Thickness[n],
Density[n], Dilution[n]);
        n++;
    }
    fclose(out);
}
else
printf("can't open the output file\n",filename);
}
```

ANNEXE G

Les résultats calculés par le modèle 2

Enter a file name of dilution used:d0

Enter a file name of th_0:th_0

Enter a file name of tau:tau

please give the initial density

1.08

please give the initial dilution

0.43

please give the rate of precipitation(I) in g/dm²h

0.42

please give the interval time(delta_t) in second

20

please give the max dilution

0.80

please give the time(temp) in minute to know the dilution values

150

n	time(min)	thickness(micron)	density	dilution
0	0.00000	430.56000	1.08000	0.43000
1	0.33333	427.20020	1.07996	0.43029
2	0.66667	423.86633	1.07991	0.43058
3	1.00000	420.55820	1.07987	0.43087
4	1.33333	417.27560	1.07982	0.43117
5	1.66667	414.01834	1.07978	0.43146
6	2.00000	410.78622	1.07973	0.43176
7	2.33333	407.57907	1.07969	0.43206
8	2.66667	404.39667	1.07964	0.43237
9	3.00000	401.23883	1.07959	0.43267
10	3.33333	398.10538	1.07955	0.43298
11	3.66667	394.99609	1.07950	0.43329
12	4.00000	391.91083	1.07945	0.43360
13	4.33333	388.84937	1.07941	0.43392
14	4.66667	385.81155	1.07936	0.43424
15	5.00000	382.79718	1.07931	0.43455
16	5.33333	379.80609	1.07926	0.43488
17	5.66667	376.83807	1.07921	0.43520
18	6.00000	373.89297	1.07916	0.43553
19	6.33333	370.97061	1.07911	0.43586
20	6.66667	368.07080	1.07906	0.43619
21	7.00000	365.19339	1.07901	0.43652
22	7.33333	362.33820	1.07896	0.43686
23	7.66667	359.50504	1.07891	0.43720
24	8.00000	356.69376	1.07886	0.43754
25	8.33333	353.90417	1.07881	0.43788
26	8.66667	351.13614	1.07875	0.43823
27	9.00000	348.38947	1.07870	0.43858
28	9.33333	345.66400	1.07865	0.43893
29	9.66667	342.95956	1.07859	0.43928
30	10.00000	340.27600	1.07854	0.43964
31	10.33333	337.61316	1.07849	0.44000
32	10.66667	334.97089	1.07843	0.44036

33	11.00000	332.34900	1.07838	0.44072
34	11.33333	329.74738	1.07832	0.44109
35	11.66667	327.16583	1.07827	0.44146
36	12.00000	324.60422	1.07821	0.44183
37	12.33333	322.06238	1.07815	0.44221
38	12.66667	319.54016	1.07810	0.44259
39	13.00000	317.03741	1.07804	0.44297
40	13.33333	314.55399	1.07798	0.44335
41	13.66667	312.08975	1.07792	0.44374
42	14.00000	309.64453	1.07786	0.44412
43	14.33333	307.21820	1.07780	0.44452
44	14.66667	304.81061	1.07774	0.44491
45	15.00000	302.42160	1.07768	0.44531
46	15.33333	300.05103	1.07762	0.44571
47	15.66667	297.69876	1.07756	0.44611
48	16.00000	295.36465	1.07750	0.44652
49	16.33333	293.04858	1.07744	0.44693
50	16.66667	290.75040	1.07738	0.44734
51	17.00000	288.46994	1.07732	0.44775
52	17.33333	286.20709	1.07725	0.44817
53	17.66667	283.96173	1.07719	0.44859
54	18.00000	281.73370	1.07712	0.44902
55	18.33333	279.52286	1.07706	0.44944
56	18.66667	277.32910	1.07700	0.44987
57	19.00000	275.15228	1.07693	0.45031
58	19.33333	272.99228	1.07686	0.45074
59	19.66667	270.84894	1.07680	0.45118
60	20.00000	268.72217	1.07673	0.45163
61	20.33333	266.61182	1.07666	0.45207
62	20.66667	264.51776	1.07660	0.45252
63	21.00000	262.43988	1.07653	0.45297
64	21.33333	260.37805	1.07646	0.45343
65	21.66667	258.33212	1.07639	0.45389
66	22.00000	256.30200	1.07632	0.45435
67	22.33333	254.28757	1.07625	0.45481
68	22.66667	252.28868	1.07618	0.45528
69	23.00000	250.30524	1.07611	0.45575
70	23.33333	248.33711	1.07604	0.45623
71	23.66667	246.38419	1.07597	0.45671
72	24.00000	244.44633	1.07589	0.45719
73	24.33333	242.52345	1.07582	0.45768
74	24.66667	240.61542	1.07575	0.45816
75	25.00000	238.72212	1.07567	0.45866
76	25.33333	236.84346	1.07560	0.45915
77	25.66667	234.97929	1.07552	0.45965
78	26.00000	233.12953	1.07545	0.46015
79	26.33333	231.29407	1.07537	0.46066
80	26.66667	229.47278	1.07530	0.46117
81	27.00000	227.66554	1.07522	0.46168
82	27.33333	225.87227	1.07514	0.46220
83	27.66667	224.09285	1.07506	0.46272
84	28.00000	222.32718	1.07498	0.46325
85	28.33333	220.57515	1.07490	0.46378

139	46.33333	143.58043	1.06973	0.49844
140	46.66667	142.43700	1.06961	0.49920
141	47.00000	141.30241	1.06950	0.49998
142	47.33333	140.17661	1.06938	0.50076
143	47.66667	139.06342	1.06926	0.50154
144	48.00000	137.96281	1.06915	0.50233
145	48.33333	136.87463	1.06903	0.50312
146	48.66667	135.79871	1.06891	0.50392
147	49.00000	134.73488	1.06879	0.50472
148	49.33333	133.68301	1.06867	0.50553
149	49.66667	132.64294	1.06855	0.50635
150	50.00000	131.61453	1.06843	0.50717
151	50.33333	130.59761	1.06831	0.50799
152	50.66667	129.59206	1.06818	0.50882
153	51.00000	128.59770	1.06806	0.50965
154	51.33333	127.61443	1.06793	0.51049
155	51.66667	126.64207	1.06781	0.51134
156	52.00000	125.68052	1.06768	0.51219
157	52.33333	124.72961	1.06756	0.51304
158	52.66667	123.78922	1.06743	0.51390
159	53.00000	122.85921	1.06730	0.51477
160	53.33333	121.93945	1.06717	0.51564
161	53.66667	121.02982	1.06704	0.51651
162	54.00000	120.13018	1.06691	0.51739
163	54.33333	119.24041	1.06678	0.51828
164	54.66667	118.36038	1.06665	0.51917
165	55.00000	117.48997	1.06652	0.52006
166	55.33333	116.62907	1.06639	0.52096
167	55.66667	115.77753	1.06625	0.52187
168	56.00000	114.93525	1.06612	0.52278
169	56.33333	114.10212	1.06598	0.52370
170	56.66667	113.27802	1.06585	0.52462
171	57.00000	112.46281	1.06571	0.52554
172	57.33333	111.65643	1.06557	0.52647
173	57.66667	110.85873	1.06543	0.52741
174	58.00000	110.06960	1.06530	0.52835
175	58.33333	109.28895	1.06516	0.52929
176	58.66667	108.51666	1.06502	0.53024
177	59.00000	107.75264	1.06488	0.53120
178	59.33333	106.99677	1.06473	0.53216
179	59.66667	106.24895	1.06459	0.53312
180	60.00000	105.50909	1.06445	0.53409
181	60.33333	104.77708	1.06431	0.53507
182	60.66667	104.05283	1.06416	0.53605
183	61.00000	103.33624	1.06402	0.53703
184	61.33333	102.62720	1.06387	0.53802
185	61.66667	101.92564	1.06372	0.53902
186	62.00000	101.23145	1.06358	0.54002
187	62.33333	100.54453	1.06343	0.54102
188	62.66667	99.86480	1.06328	0.54203
189	63.00000	99.19218	1.06313	0.54304
190	63.33333	98.52657	1.06298	0.54406
191	63.66667	97.86789	1.06283	0.54508

192	64.00000	97.21604	1.06268	0.54611
193	64.33333	96.57094	1.06253	0.54714
194	64.66667	95.93251	1.06238	0.54818
195	65.00000	95.30067	1.06223	0.54922
196	65.33333	94.67533	1.06207	0.55027
197	65.66667	94.05643	1.06192	0.55132
198	66.00000	93.44386	1.06176	0.55237
199	66.33333	92.83755	1.06161	0.55343
200	66.66667	92.23744	1.06145	0.55450
201	67.00000	91.64343	1.06130	0.55557
202	67.33333	91.05547	1.06114	0.55664
203	67.66667	90.47346	1.06098	0.55772
204	68.00000	89.89735	1.06082	0.55880
205	68.33333	89.32705	1.06066	0.55988
206	68.66667	88.76250	1.06051	0.56098
207	69.00000	88.20361	1.06035	0.56207
208	69.33333	87.65034	1.06018	0.56317
209	69.66667	87.10258	1.06002	0.56427
210	70.00000	86.56030	1.05986	0.56538
211	70.33333	86.02343	1.05970	0.56650
212	70.66667	85.49189	1.05954	0.56761
213	71.00000	84.96561	1.05937	0.56873
214	71.33333	84.44454	1.05921	0.56986
215	71.66667	83.92861	1.05904	0.57099
216	72.00000	83.41776	1.05888	0.57212
217	72.33333	82.91192	1.05871	0.57326
218	72.66667	82.41103	1.05855	0.57440
219	73.00000	81.91504	1.05838	0.57554
220	73.33333	81.42389	1.05821	0.57669
221	73.66667	80.93752	1.05805	0.57785
222	74.00000	80.45586	1.05788	0.57900
223	74.33333	79.97885	1.05771	0.58017
224	74.66667	79.50645	1.05754	0.58133
225	75.00000	79.03860	1.05737	0.58250
226	75.33333	78.57525	1.05720	0.58367
227	75.66667	78.11634	1.05703	0.58485
228	76.00000	77.66182	1.05686	0.58603
229	76.33333	77.21162	1.05668	0.58721
230	76.66667	76.76571	1.05651	0.58840
231	77.00000	76.32403	1.05634	0.58959
232	77.33333	75.88653	1.05617	0.59079
233	77.66667	75.45316	1.05599	0.59199
234	78.00000	75.02386	1.05582	0.59319
235	78.33333	74.59860	1.05564	0.59439
236	78.66667	74.17732	1.05547	0.59560
237	79.00000	73.75998	1.05529	0.59681
238	79.33333	73.34652	1.05512	0.59803
239	79.66667	72.93690	1.05494	0.59925
240	80.00000	72.53109	1.05476	0.60047
241	80.33333	72.12772	1.05459	0.60170
242	80.66667	71.72469	1.05441	0.60292
243	81.00000	71.32200	1.05423	0.60416
244	81.33333	70.91963	1.05405	0.60539

245	81.66667	70.51759	1.05387	0.60663
246	82.00000	70.11588	1.05369	0.60787
247	82.33333	69.71448	1.05352	0.60912
248	82.66667	69.31340	1.05334	0.61037
249	83.00000	68.91263	1.05315	0.61162
250	83.33333	68.51215	1.05297	0.61288
251	83.66667	68.11198	1.05279	0.61414
252	84.00000	67.71211	1.05261	0.61540
253	84.33333	67.31253	1.05243	0.61667
254	84.66667	66.91324	1.05224	0.61794
255	85.00000	66.51423	1.05206	0.61921
256	85.33333	66.11549	1.05188	0.62049
257	85.66667	65.71703	1.05169	0.62177
258	86.00000	65.31885	1.05151	0.62306
259	86.33333	64.92093	1.05132	0.62434
260	86.66667	64.52326	1.05114	0.62564
261	87.00000	64.12585	1.05095	0.62693
262	87.33333	63.72869	1.05077	0.62823
263	87.66667	63.33176	1.05058	0.62954
264	88.00000	62.93509	1.05039	0.63084
265	88.33333	62.53864	1.05020	0.63216
266	88.66667	62.14242	1.05001	0.63347
267	89.00000	61.74642	1.04983	0.63479
268	89.33333	61.35064	1.04964	0.63611
269	89.66667	60.95506	1.04945	0.63744
270	90.00000	60.55969	1.04926	0.63877
271	90.33333	60.16452	1.04906	0.64011
272	90.66667	59.76954	1.04887	0.64145
273	91.00000	59.37473	1.04868	0.64279
274	91.33333	58.98011	1.04849	0.64414
275	91.66667	58.58566	1.04830	0.64549
276	92.00000	58.19138	1.04810	0.64685
277	92.33333	57.79726	1.04791	0.64821
278	92.66667	57.40329	1.04771	0.64957
279	93.00000	57.00946	1.04752	0.65094
280	93.33333	56.61577	1.04732	0.65232
281	93.66667	56.22221	1.04713	0.65369
282	94.00000	55.82877	1.04693	0.65508
283	94.33333	55.43544	1.04673	0.65646
284	94.66667	55.04222	1.04653	0.65785
285	95.00000	54.64909	1.04633	0.65925
286	95.33333	54.25606	1.04613	0.66065
287	95.66667	53.86310	1.04593	0.66206
288	96.00000	53.47022	1.04573	0.66347
289	96.33333	53.07740	1.04553	0.66488
290	96.66667	52.68464	1.04533	0.66630
291	97.00000	52.29193	1.04513	0.66773
292	97.33333	51.89924	1.04493	0.66916
293	97.66667	51.50658	1.04472	0.67059
294	98.00000	51.11395	1.04452	0.67203
295	98.33333	50.72130	1.04431	0.67348
296	98.66667	50.32866	1.04411	0.67492
297	99.00000	49.93600	1.04390	0.67638

298	99.33333	49.54330	1.04370	0.67784
299	99.66667	49.15058	1.04349	0.67931
300	100.00000	48.75779	1.04328	0.68078
301	100.33333	48.36495	1.04307	0.68225
302	100.66667	47.97203	1.04286	0.68374
303	101.00000	47.57901	1.04265	0.68522
304	101.33333	47.18589	1.04244	0.68672
305	101.66667	46.79266	1.04223	0.68822
306	102.00000	46.39929	1.04202	0.68972
307	102.33333	46.00578	1.04180	0.69123
308	102.66667	45.61211	1.04159	0.69275
309	103.00000	45.21827	1.04138	0.69427
310	103.33333	44.82423	1.04116	0.69580
311	103.66667	44.42998	1.04094	0.69733
312	104.00000	44.03550	1.04073	0.69887
313	104.33333	43.64079	1.04051	0.70042
314	104.66667	43.24798	1.04029	0.70197
315	105.00000	42.86281	1.04007	0.70353
316	105.33333	42.48506	1.03985	0.70510
317	105.66667	42.11453	1.03963	0.70667
318	106.00000	41.75102	1.03941	0.70825
319	106.33333	41.39434	1.03919	0.70983
320	106.66667	41.04430	1.03896	0.71142
321	107.00000	40.70073	1.03874	0.71301
322	107.33333	40.36346	1.03852	0.71461
323	107.66667	40.03232	1.03829	0.71621
324	108.00000	39.70715	1.03807	0.71782
325	108.33333	39.38778	1.03784	0.71943
326	108.66667	39.07407	1.03762	0.72104
327	109.00000	38.76588	1.03739	0.72266
328	109.33333	38.46306	1.03716	0.72428
329	109.66667	38.16547	1.03693	0.72591
330	110.00000	37.87299	1.03671	0.72754
331	110.33333	37.58547	1.03648	0.72917
332	110.66667	37.30280	1.03625	0.73081
333	111.00000	37.02485	1.03602	0.73244
334	111.33333	36.75151	1.03579	0.73408
335	111.66667	36.48266	1.03557	0.73573
336	112.00000	36.21820	1.03534	0.73737
337	112.33333	35.95802	1.03511	0.73902
338	112.66667	35.70200	1.03488	0.74066
339	113.00000	35.45006	1.03465	0.74231
340	113.33333	35.20209	1.03442	0.74397
341	113.66667	34.95800	1.03419	0.74562
342	114.00000	34.71769	1.03396	0.74727
343	114.33333	34.48109	1.03373	0.74893
344	114.66667	34.24809	1.03350	0.75058
345	115.00000	34.01861	1.03327	0.75224
346	115.33333	33.79258	1.03304	0.75389
347	115.66667	33.56992	1.03281	0.75555
348	116.00000	33.35054	1.03258	0.75721
349	116.33333	33.13438	1.03235	0.75886
350	116.66667	32.92136	1.03212	0.76052

351	117.00000	32.71141	1.03189	0.76217
352	117.33333	32.50446	1.03166	0.76383
353	117.66667	32.30044	1.03143	0.76548
354	118.00000	32.09929	1.03121	0.76713
355	118.33333	31.90094	1.03098	0.76879
356	118.66667	31.70534	1.03075	0.77044
357	119.00000	31.51243	1.03052	0.77209
358	119.33333	31.32214	1.03030	0.77373
359	119.66667	31.13442	1.03007	0.77538
360	120.00000	30.94922	1.02984	0.77703
361	120.33333	30.76647	1.02961	0.77867
362	120.66667	30.58614	1.02939	0.78031
363	121.00000	30.40816	1.02916	0.78195
364	121.33333	30.23249	1.02894	0.78358
365	121.66667	30.05909	1.02871	0.78521
366	122.00000	29.88789	1.02849	0.78685
367	122.33333	29.71887	1.02827	0.78847
368	122.66667	29.55197	1.02804	0.79010
369	123.00000	29.38715	1.02782	0.79172
370	123.33333	29.22437	1.02760	0.79334
371	123.66667	29.06359	1.02738	0.79495
372	124.00000	28.90476	1.02716	0.79656
373	124.33333	28.74786	1.02694	0.79817
374	124.66667	28.59283	1.02672	0.79978
375	125.00000	28.43965	1.02650	0.80138

Enter a file name of dilution used:d0

Enter a file name of th_0:th_0

Enter a file name of tau:tau

please give the initial density

1.08

please give the initial dilution

0.43

please give the rate of precipitation(I) in g/dm²h

1.52

please give the interval time(delta_t) in second

20

please give the max dilution

0.80

please give the time(temp) in minute to know the dilution values

100

n	time(min)	thickness(micron)	density	dilution
0	0.00000	430.56000	1.08000	0.43000
1	0.33333	427.20020	1.07984	0.43104
2	0.66667	423.86560	1.07968	0.43209
3	1.00000	420.55600	1.07952	0.43315
4	1.33333	417.27121	1.07936	0.43421
5	1.66667	414.01108	1.07920	0.43528
6	2.00000	410.77539	1.07904	0.43636
7	2.33333	407.56396	1.07887	0.43744
8	2.66667	404.37665	1.07871	0.43853
9	3.00000	401.21323	1.07854	0.43962
10	3.33333	398.07355	1.07838	0.44073
11	3.66667	394.95743	1.07821	0.44184
12	4.00000	391.86469	1.07804	0.44295
13	4.33333	388.79514	1.07787	0.44407
14	4.66667	385.74863	1.07770	0.44520
15	5.00000	382.72498	1.07753	0.44634
16	5.33333	379.72403	1.07736	0.44748
17	5.66667	376.74561	1.07718	0.44863
18	6.00000	373.78952	1.07701	0.44979
19	6.33333	370.85562	1.07683	0.45095
20	6.66667	367.94376	1.07666	0.45212
21	7.00000	365.05377	1.07648	0.45330
22	7.33333	362.18549	1.07630	0.45448
23	7.66667	359.33871	1.07612	0.45568
24	8.00000	356.51334	1.07594	0.45687
25	8.33333	353.70917	1.07576	0.45808
26	8.66667	350.92606	1.07558	0.45929
27	9.00000	348.16385	1.07539	0.46051
28	9.33333	345.42239	1.07521	0.46174
29	9.66667	342.70154	1.07503	0.46297

30	10.00000	340.00113	1.07484	0.46421
31	10.33333	337.32101	1.07465	0.46546
32	10.66667	334.66104	1.07446	0.46672
33	11.00000	332.02106	1.07427	0.46798
34	11.33333	329.40091	1.07408	0.46925
35	11.66667	326.80045	1.07389	0.47053
36	12.00000	324.21954	1.07370	0.47181
37	12.33333	321.65805	1.07351	0.47310
38	12.66667	319.11581	1.07331	0.47440
39	13.00000	316.59268	1.07312	0.47571
40	13.33333	314.08853	1.07292	0.47702
41	13.66667	311.60321	1.07272	0.47834
42	14.00000	309.13660	1.07252	0.47967
43	14.33333	306.68854	1.07232	0.48101
44	14.66667	304.25888	1.07212	0.48235
45	15.00000	301.84750	1.07192	0.48370
46	15.33333	299.45428	1.07172	0.48506
47	15.66667	297.07907	1.07151	0.48643
48	16.00000	294.72174	1.07131	0.48780
49	16.33333	292.38214	1.07110	0.48918
50	16.66667	290.06015	1.07090	0.49057
51	17.00000	287.75565	1.07069	0.49197
52	17.33333	285.46848	1.07048	0.49337
53	17.66667	283.19855	1.07027	0.49478
54	18.00000	280.94571	1.07006	0.49620
55	18.33333	278.70984	1.06985	0.49763
56	18.66667	276.49081	1.06963	0.49906
57	19.00000	274.28851	1.06942	0.50050
58	19.33333	272.10791	1.06920	0.50195
59	19.66667	269.95819	1.06899	0.50341
60	20.00000	267.83878	1.06877	0.50488
61	20.33333	265.74911	1.06855	0.50635
62	20.66667	263.68869	1.06833	0.50783
63	21.00000	261.65698	1.06811	0.50931
64	21.33333	259.65347	1.06789	0.51081
65	21.66667	257.67764	1.06767	0.51231
66	22.00000	255.72902	1.06744	0.51382
67	22.33333	253.80710	1.06722	0.51533
68	22.66667	251.91142	1.06699	0.51686
69	23.00000	250.04152	1.06677	0.51839
70	23.33333	248.19695	1.06654	0.51992
71	23.66667	246.37724	1.06631	0.52147
72	24.00000	244.58199	1.06608	0.52302
73	24.33333	242.81073	1.06585	0.52457
74	24.66667	241.06306	1.06562	0.52614
75	25.00000	239.33858	1.06539	0.52770
76	25.33333	237.63687	1.06516	0.52928
77	25.66667	235.95753	1.06492	0.53086
78	26.00000	234.30019	1.06469	0.53245
79	26.33333	232.66444	1.06446	0.53404
80	26.66667	231.04994	1.06422	0.53564
81	27.00000	229.45631	1.06398	0.53725
82	27.33333	227.88319	1.06375	0.53886

83	27.66667	226.33023	1.06351	0.54048
84	28.00000	224.79709	1.06327	0.54210
85	28.33333	223.28342	1.06303	0.54373
86	28.66667	221.78889	1.06279	0.54537
87	29.00000	220.31320	1.06255	0.54701
88	29.33333	218.85602	1.06231	0.54865
89	29.66667	217.41702	1.06207	0.55030
90	30.00000	215.99591	1.06182	0.55196
91	30.33333	214.59239	1.06158	0.55362
92	30.66667	213.20616	1.06134	0.55529
93	31.00000	211.83693	1.06109	0.55696
94	31.33333	210.48442	1.06085	0.55863
95	31.66667	209.14836	1.06060	0.56031
96	32.00000	207.82848	1.06036	0.56200
97	32.33333	206.52449	1.06011	0.56369
98	32.66667	205.23615	1.05986	0.56538
99	33.00000	203.96320	1.05961	0.56708
100	33.33333	202.70537	1.05937	0.56878
101	33.66667	201.46243	1.05912	0.57049
102	34.00000	200.23415	1.05887	0.57220
103	34.33333	199.02025	1.05862	0.57391
104	34.66667	197.82053	1.05837	0.57563
105	35.00000	196.63475	1.05812	0.57735
106	35.33333	195.46269	1.05787	0.57908
107	35.66667	194.30414	1.05761	0.58081
108	36.00000	193.15886	1.05736	0.58254
109	36.33333	192.02664	1.05711	0.58428
110	36.66667	190.90729	1.05686	0.58602
111	37.00000	189.80060	1.05660	0.58776
112	37.33333	188.70636	1.05635	0.58951
113	37.66667	187.62439	1.05610	0.59126
114	38.00000	186.55449	1.05584	0.59301
115	38.33333	185.49646	1.05559	0.59477
116	38.66667	184.45012	1.05533	0.59652
117	39.00000	183.41528	1.05508	0.59828
118	39.33333	182.39177	1.05482	0.60005
119	39.66667	181.37909	1.05457	0.60181
120	40.00000	180.36514	1.05431	0.60358
121	40.33333	179.34990	1.05406	0.60535
122	40.66667	178.33334	1.05380	0.60713
123	41.00000	177.31544	1.05355	0.60890
124	41.33333	176.29619	1.05329	0.61068
125	41.66667	175.27556	1.05303	0.61246
126	42.00000	174.25352	1.05278	0.61424
127	42.33333	173.23007	1.05252	0.61603
128	42.66667	172.20517	1.05226	0.61782
129	43.00000	171.17880	1.05200	0.61961
130	43.33333	170.15092	1.05175	0.62141
131	43.66667	169.12152	1.05149	0.62321
132	44.00000	168.09058	1.05123	0.62501
133	44.33333	167.05806	1.05097	0.62681
134	44.66667	166.02393	1.05071	0.62862
135	45.00000	164.98817	1.05045	0.63043

136	45.33333	163.95076	1.05019	0.63224
137	45.66667	162.91165	1.04993	0.63405
138	46.00000	161.87082	1.04967	0.63587
139	46.33333	160.82823	1.04941	0.63769
140	46.66667	159.78386	1.04915	0.63952
141	47.00000	158.73767	1.04889	0.64135
142	47.33333	157.68964	1.04863	0.64318
143	47.66667	156.63971	1.04836	0.64501
144	48.00000	155.58786	1.04810	0.64685
145	48.33333	154.53406	1.04784	0.64869
146	48.66667	153.47826	1.04757	0.65054
147	49.00000	152.42041	1.04731	0.65239
148	49.33333	151.36049	1.04705	0.65424
149	49.66667	150.29845	1.04678	0.65610
150	50.00000	149.23425	1.04652	0.65796
151	50.33333	148.16786	1.04625	0.65982
152	50.66667	147.09921	1.04599	0.66169
153	51.00000	146.02827	1.04572	0.66356
154	51.33333	144.95499	1.04545	0.66543
155	51.66667	143.87932	1.04519	0.66731
156	52.00000	142.80121	1.04492	0.66919
157	52.33333	141.72060	1.04465	0.67108
158	52.66667	140.63744	1.04439	0.67297
159	53.00000	139.55167	1.04412	0.67487
160	53.33333	138.46324	1.04385	0.67677
161	53.66667	137.37209	1.04358	0.67867
162	54.00000	136.27815	1.04331	0.68058
163	54.33333	135.18137	1.04304	0.68249
164	54.66667	134.08167	1.04277	0.68441
165	55.00000	132.97897	1.04249	0.68633
166	55.33333	131.87321	1.04222	0.68826
167	55.66667	130.76433	1.04195	0.69019
168	56.00000	129.65224	1.04168	0.69213
169	56.33333	128.53687	1.04140	0.69407
170	56.66667	127.41812	1.04113	0.69602
171	57.00000	126.29592	1.04085	0.69797
172	57.33333	125.17017	1.04058	0.69993
173	57.66667	124.04079	1.04030	0.70189
174	58.00000	122.93545	1.04002	0.70386
175	58.33333	121.85439	1.03975	0.70583
176	58.66667	120.79678	1.03947	0.70781
177	59.00000	119.76187	1.03919	0.70980
178	59.33333	118.74892	1.03891	0.71178
179	59.66667	117.75719	1.03863	0.71377
180	60.00000	116.78603	1.03835	0.71576
181	60.33333	115.83477	1.03807	0.71776
182	60.66667	114.90278	1.03779	0.71976
183	61.00000	113.98946	1.03751	0.72176
184	61.33333	113.09422	1.03723	0.72376
185	61.66667	112.21652	1.03695	0.72577
186	62.00000	111.35581	1.03667	0.72777
187	62.33333	110.51159	1.03639	0.72978
188	62.66667	109.68335	1.03611	0.73179

189	63.00000	108.87062	1.03583	0.73380
190	63.33333	108.07294	1.03555	0.73581
191	63.66667	107.28986	1.03527	0.73781
192	64.00000	106.52097	1.03499	0.73982
193	64.33333	105.76586	1.03471	0.74183
194	64.66667	105.02412	1.03444	0.74384
195	65.00000	104.29539	1.03416	0.74584
196	65.33333	103.57929	1.03388	0.74785
197	65.66667	102.87548	1.03360	0.74985
198	66.00000	102.18360	1.03332	0.75185
199	66.33333	101.50334	1.03305	0.75385
200	66.66667	100.83438	1.03277	0.75584
201	67.00000	100.17641	1.03249	0.75784
202	67.33333	99.52913	1.03222	0.75983
203	67.66667	98.89227	1.03194	0.76182
204	68.00000	98.26554	1.03167	0.76380
205	68.33333	97.64868	1.03139	0.76578
206	68.66667	97.04144	1.03112	0.76776
207	69.00000	96.44356	1.03085	0.76973
208	69.33333	95.85480	1.03058	0.77170
209	69.66667	95.27494	1.03030	0.77366
210	70.00000	94.70375	1.03003	0.77562
211	70.33333	94.14101	1.02977	0.77758
212	70.66667	93.58652	1.02950	0.77952
213	71.00000	93.04005	1.02923	0.78147
214	71.33333	92.50143	1.02896	0.78341
215	71.66667	91.97047	1.02870	0.78534
216	72.00000	91.44696	1.02843	0.78727
217	72.33333	90.93075	1.02817	0.78919
218	72.66667	90.42165	1.02790	0.79111
219	73.00000	89.91949	1.02764	0.79301
220	73.33333	89.42411	1.02738	0.79492
221	73.66667	88.93536	1.02712	0.79681
222	74.00000	88.45309	1.02686	0.79870
223	74.33333	87.97713	1.02660	0.80058

Enter a file name of dilution used:d0

Enter a file name of th_0:th_0

Enter a file name of tau:tau

please give the initial density

1.08

please give the initial dilution

0.43

please give the rate of precipitation(I) in g/dm²h

3.04

please give the interval time(delta_t) in second

20

please give the max dilution

0.80

please give the time(temp) in minute to know the dilution values

60

n	time(min)	thickness(micron)	density	dilution
0	0.00000	430.56000	1.08000	0.43000
1	0.33333	427.20020	1.07968	0.43209
2	0.66667	423.86456	1.07937	0.43418
3	1.00000	420.55295	1.07905	0.43629
4	1.33333	417.26517	1.07873	0.43840
5	1.66667	414.00104	1.07841	0.44053
6	2.00000	410.76041	1.07808	0.44266
7	2.33333	407.54312	1.07776	0.44481
8	2.66667	404.34903	1.07744	0.44696
9	3.00000	401.17795	1.07711	0.44912
10	3.33333	398.02972	1.07678	0.45129
11	3.66667	394.90417	1.07645	0.45347
12	4.00000	391.80118	1.07612	0.45566
13	4.33333	388.72058	1.07579	0.45786
14	4.66667	385.66220	1.07546	0.46007
15	5.00000	382.62589	1.07513	0.46228
16	5.33333	379.61148	1.07479	0.46451
17	5.66667	376.61887	1.07446	0.46674
18	6.00000	373.64786	1.07412	0.46899
19	6.33333	370.69833	1.07378	0.47124
20	6.66667	367.77011	1.07345	0.47350
21	7.00000	364.86307	1.07311	0.47577
22	7.33333	361.97705	1.07276	0.47805
23	7.66667	359.11191	1.07242	0.48034
24	8.00000	356.26749	1.07208	0.48264
25	8.33333	353.44366	1.07174	0.48495
26	8.66667	350.64029	1.07139	0.48726
27	9.00000	347.85724	1.07104	0.48959
28	9.33333	345.09436	1.07070	0.49192
29	9.66667	342.35150	1.07035	0.49426
30	10.00000	339.62854	1.07000	0.49661

31	10.33333	336.92532	1.06965	0.49897
32	10.66667	334.24173	1.06929	0.50134
33	11.00000	331.59409	1.06894	0.50371
34	11.33333	328.99414	1.06859	0.50610
35	11.66667	326.44067	1.06823	0.50849
36	12.00000	323.93246	1.06788	0.51089
37	12.33333	321.46835	1.06752	0.51330
38	12.66667	319.04721	1.06716	0.51571
39	13.00000	316.66791	1.06680	0.51813
40	13.33333	314.32944	1.06645	0.52056
41	13.66667	312.03073	1.06609	0.52299
42	14.00000	309.77081	1.06573	0.52543
43	14.33333	307.54874	1.06536	0.52788
44	14.66667	305.36356	1.06500	0.53033
45	15.00000	303.21432	1.06464	0.53279
46	15.33333	301.10022	1.06428	0.53525
47	15.66667	299.02036	1.06392	0.53772
48	16.00000	296.97391	1.06355	0.54019
49	16.33333	294.96008	1.06319	0.54267
50	16.66667	292.97809	1.06282	0.54515
51	17.00000	291.02719	1.06246	0.54763
52	17.33333	289.10663	1.06209	0.55012
53	17.66667	287.21570	1.06173	0.55261
54	18.00000	285.35373	1.06136	0.55511
55	18.33333	283.52002	1.06100	0.55760
56	18.66667	281.71393	1.06063	0.56011
57	19.00000	279.93481	1.06027	0.56261
58	19.33333	278.18210	1.05990	0.56511
59	19.66667	276.45514	1.05953	0.56762
60	20.00000	274.75339	1.05917	0.57013
61	20.33333	273.07626	1.05880	0.57264
62	20.66667	271.42322	1.05844	0.57515
63	21.00000	269.79370	1.05807	0.57767
64	21.33333	268.18723	1.05771	0.58018
65	21.66667	266.60327	1.05734	0.58270
66	22.00000	265.04135	1.05697	0.58521
67	22.33333	263.50098	1.05661	0.58773
68	22.66667	261.98169	1.05624	0.59025
69	23.00000	260.48303	1.05588	0.59276
70	23.33333	259.00458	1.05552	0.59528
71	23.66667	257.54590	1.05515	0.59779
72	24.00000	256.10657	1.05479	0.60031
73	24.33333	254.68318	1.05442	0.60282
74	24.66667	253.25386	1.05406	0.60533
75	25.00000	251.81851	1.05370	0.60785
76	25.33333	250.37708	1.05334	0.61036
77	25.66667	248.92944	1.05297	0.61287
78	26.00000	247.47556	1.05261	0.61538
79	26.33333	246.01530	1.05225	0.61789
80	26.66667	244.54860	1.05189	0.62040
81	27.00000	243.07536	1.05153	0.62290
82	27.33333	241.59549	1.05117	0.62541
83	27.66667	240.10889	1.05081	0.62792

84	28.00000	238.61545	1.05045	0.63043
85	28.33333	237.11507	1.05009	0.63293
86	28.66667	235.60765	1.04973	0.63544
87	29.00000	234.09308	1.04937	0.63795
88	29.33333	232.57123	1.04901	0.64045
89	29.66667	231.04199	1.04866	0.64296
90	30.00000	229.50523	1.04830	0.64546
91	30.33333	227.96085	1.04794	0.64797
92	30.66667	226.40869	1.04758	0.65048
93	31.00000	224.84865	1.04723	0.65298
94	31.33333	223.28056	1.04687	0.65549
95	31.66667	221.70430	1.04651	0.65800
96	32.00000	220.11971	1.04615	0.66051
97	32.33333	218.52663	1.04580	0.66302
98	32.66667	216.92490	1.04544	0.66553
99	33.00000	215.31436	1.04508	0.66804
100	33.33333	213.69485	1.04473	0.67055
101	33.66667	212.06619	1.04437	0.67306
102	34.00000	210.42818	1.04402	0.67557
103	34.33333	208.78064	1.04366	0.67809
104	34.66667	207.12337	1.04330	0.68060
105	35.00000	205.45616	1.04295	0.68312
106	35.33333	203.77879	1.04259	0.68564
107	35.66667	202.09105	1.04224	0.68816
108	36.00000	200.39268	1.04188	0.69068
109	36.33333	198.68347	1.04152	0.69321
110	36.66667	196.96313	1.04117	0.69574
111	37.00000	195.23141	1.04081	0.69826
112	37.33333	193.48804	1.04046	0.70080
113	37.66667	191.75093	1.04010	0.70333
114	38.00000	190.05870	1.03974	0.70586
115	38.33333	188.40947	1.03939	0.70840
116	38.66667	186.80147	1.03903	0.71094
117	39.00000	185.23302	1.03868	0.71348
118	39.33333	183.70253	1.03832	0.71601
119	39.66667	182.20851	1.03796	0.71855
120	40.00000	180.74953	1.03761	0.72108
121	40.33333	179.32422	1.03726	0.72362
122	40.66667	177.93130	1.03690	0.72615
123	41.00000	176.56956	1.03655	0.72867
124	41.33333	175.23784	1.03620	0.73120
125	41.66667	173.93501	1.03585	0.73372
126	42.00000	172.66003	1.03549	0.73623
127	42.33333	171.41191	1.03514	0.73874
128	42.66667	170.18967	1.03480	0.74125
129	43.00000	168.99242	1.03445	0.74375
130	43.33333	167.81927	1.03410	0.74624
131	43.66667	166.66942	1.03376	0.74873
132	44.00000	165.54205	1.03341	0.75121
133	44.33333	164.43642	1.03307	0.75368
134	44.66667	163.35179	1.03273	0.75615
135	45.00000	162.28749	1.03239	0.75861
136	45.33333	161.24284	1.03205	0.76106

137	45.66667	160.21722	1.03171	0.76350
138	46.00000	159.21002	1.03137	0.76593
139	46.33333	158.22066	1.03104	0.76835
140	46.66667	157.24857	1.03070	0.77077
141	47.00000	156.29323	1.03037	0.77317
142	47.33333	155.35413	1.03004	0.77557
143	47.66667	154.43077	1.02971	0.77795
144	48.00000	153.52267	1.02939	0.78032
145	48.33333	152.62941	1.02906	0.78268
146	48.66667	151.75052	1.02874	0.78504
147	49.00000	150.88559	1.02842	0.78738
148	49.33333	150.03423	1.02810	0.78970
149	49.66667	149.19604	1.02778	0.79202
150	50.00000	148.37067	1.02746	0.79432
151	50.33333	147.55774	1.02715	0.79662
152	50.66667	146.75691	1.02684	0.79890
153	51.00000	145.96785	1.02653	0.80116

Enter a file name of dilution used:d0

Enter a file name of th_0:th_0

Enter a file name of tau:tau

please give the initial density

1.08

please give the initial dilution

0.43

please give the rate of precipitation(I) in g/dm²h

5.22

please give the interval time(delta_t) in second

20

please give the max dilution

0.80

please give the time(temp) in minute to know the dilution values

40

n	time(min)	thickness(micron)	density	dilution
0	0.00000	430.56000	1.08000	0.43000
1	0.33333	427.20020	1.07946	0.43358
2	0.66667	423.86310	1.07891	0.43718
3	1.00000	420.54855	1.07837	0.44078
4	1.33333	417.25644	1.07782	0.44438
5	1.66667	413.98660	1.07728	0.44799
6	2.00000	410.73892	1.07673	0.45161
7	2.33333	407.51328	1.07619	0.45524
8	2.66667	404.30951	1.07564	0.45887
9	3.00000	401.12750	1.07509	0.46251
10	3.33333	397.96713	1.07455	0.46616
11	3.66667	394.82828	1.07400	0.46981
12	4.00000	391.71078	1.07345	0.47346
13	4.33333	388.61453	1.07290	0.47713
14	4.66667	385.53940	1.07236	0.48079
15	5.00000	382.48526	1.07181	0.48447
16	5.33333	379.45200	1.07126	0.48815
17	5.66667	376.43945	1.07071	0.49183
18	6.00000	373.44754	1.07016	0.49552
19	6.33333	370.47610	1.06961	0.49921
20	6.66667	367.52505	1.06906	0.50290
21	7.00000	364.63336	1.06851	0.50660
22	7.33333	361.80933	1.06796	0.51031
23	7.66667	359.05038	1.06741	0.51401
24	8.00000	356.35410	1.06687	0.51772
25	8.33333	353.71817	1.06632	0.52143
26	8.66667	351.14035	1.06577	0.52514
27	9.00000	348.61856	1.06522	0.52884
28	9.33333	346.15079	1.06468	0.53255
29	9.66667	343.73511	1.06413	0.53626
30	10.00000	341.36972	1.06359	0.53996
31	10.33333	339.05286	1.06304	0.54366

32	10.66667	336.78287	1.06250	0.54736
33	11.00000	334.55817	1.06196	0.55106
34	11.33333	332.37726	1.06142	0.55475
35	11.66667	330.23868	1.06088	0.55843
36	12.00000	328.14102	1.06034	0.56211
37	12.33333	326.08298	1.05980	0.56579
38	12.66667	324.06326	1.05927	0.56946
39	13.00000	322.08066	1.05873	0.57312
40	13.33333	320.13400	1.05820	0.57677
41	13.66667	318.22220	1.05767	0.58042
42	14.00000	316.34415	1.05714	0.58406
43	14.33333	314.49884	1.05662	0.58769
44	14.66667	312.68527	1.05609	0.59131
45	15.00000	310.90250	1.05557	0.59492
46	15.33333	309.14960	1.05505	0.59852
47	15.66667	307.42569	1.05453	0.60211
48	16.00000	305.70511	1.05401	0.60569
49	16.33333	303.97003	1.05349	0.60926
50	16.66667	302.22021	1.05298	0.61282
51	17.00000	300.45538	1.05247	0.61638
52	17.33333	298.67526	1.05196	0.61992
53	17.66667	296.87955	1.05145	0.62345
54	18.00000	295.06796	1.05095	0.62697
55	18.33333	293.24017	1.05044	0.63048
56	18.66667	291.39587	1.04994	0.63398
57	19.00000	289.53476	1.04944	0.63748
58	19.33333	287.65646	1.04894	0.64096
59	19.66667	285.76062	1.04845	0.64444
60	20.00000	283.84686	1.04795	0.64790
61	20.33333	281.91483	1.04746	0.65136
62	20.66667	279.96408	1.04697	0.65481
63	21.00000	277.99423	1.04648	0.65825
64	21.33333	276.00482	1.04599	0.66168
65	21.66667	273.99542	1.04550	0.66511
66	22.00000	271.96555	1.04502	0.66853
67	22.33333	269.91470	1.04453	0.67194
68	22.66667	267.84238	1.04405	0.67534
69	23.00000	265.74802	1.04357	0.67873
70	23.33333	263.63104	1.04309	0.68212
71	23.66667	261.49088	1.04261	0.68550
72	24.00000	259.32687	1.04214	0.68888
73	24.33333	257.13840	1.04166	0.69225
74	24.66667	254.92473	1.04119	0.69561
75	25.00000	252.68515	1.04071	0.69896
76	25.33333	250.41890	1.04024	0.70232
77	25.66667	248.19377	1.03977	0.70566
78	26.00000	246.03717	1.03930	0.70900
79	26.33333	243.94545	1.03884	0.71233
80	26.66667	241.91522	1.03837	0.71565
81	27.00000	239.94334	1.03791	0.71896
82	27.33333	238.02687	1.03745	0.72226
83	27.66667	236.16307	1.03699	0.72555
84	28.00000	234.34938	1.03653	0.72883

85	28.33333	232.58342	1.03607	0.73209
86	28.66667	230.86295	1.03562	0.73534
87	29.00000	229.18585	1.03517	0.73858
88	29.33333	227.55019	1.03472	0.74180
89	29.66667	225.95409	1.03427	0.74500
90	30.00000	224.39581	1.03383	0.74819
91	30.33333	222.87373	1.03339	0.75136
92	30.66667	221.38629	1.03295	0.75451
93	31.00000	219.93205	1.03252	0.75765
94	31.33333	218.50964	1.03209	0.76076
95	31.66667	217.11778	1.03166	0.76386
96	32.00000	215.75522	1.03123	0.76694
97	32.33333	214.42082	1.03081	0.77000
98	32.66667	213.11348	1.03039	0.77303
99	33.00000	211.83215	1.02998	0.77605
100	33.33333	210.57585	1.02956	0.77905
101	33.66667	209.34366	1.02915	0.78202
102	34.00000	208.13467	1.02875	0.78497
103	34.33333	206.94806	1.02834	0.78790
104	34.66667	205.78300	1.02795	0.79081
105	35.00000	204.63875	1.02755	0.79369
106	35.33333	203.51459	1.02716	0.79656
107	35.66667	202.40981	1.02677	0.79940
108	36.00000	201.32375	1.02638	0.80221

Enter a file name of dilution used:d0

Enter a file name of th_0:th_0

Enter a file name of tau:tau

please give the initial density

1.08

please give the initial dilution

0.43

please give the rate of precipitation(I) in g/dm²h

5.53

please give the interval time(delta_t) in second

20

please give the max dilution

0.80

please give the time(temp) in minute to know the dilution values

40

n	time(min)	thickness(micron)	density	dilution
0	0.00000	430.56000	1.08000	0.43000
1	0.33333	427.20020	1.07942	0.43380
2	0.66667	423.86288	1.07885	0.43760
3	1.00000	420.54794	1.07827	0.44141
4	1.33333	417.25522	1.07770	0.44523
5	1.66667	413.98459	1.07712	0.44905
6	2.00000	410.73593	1.07654	0.45288
7	2.33333	407.50909	1.07597	0.45671
8	2.66667	404.30399	1.07539	0.46055
9	3.00000	401.12045	1.07481	0.46439
10	3.33333	397.95837	1.07423	0.46824
11	3.66667	394.81763	1.07366	0.47210
12	4.00000	391.69809	1.07308	0.47596
13	4.33333	388.59964	1.07250	0.47982
14	4.66667	385.52216	1.07192	0.48369
15	5.00000	382.46552	1.07135	0.48756
16	5.33333	379.42960	1.07077	0.49143
17	5.66667	376.41428	1.07019	0.49531
18	6.00000	373.41943	1.06961	0.49919
19	6.33333	370.44495	1.06904	0.50308
20	6.66667	367.53247	1.06846	0.50697
21	7.00000	364.69034	1.06788	0.51086
22	7.33333	361.91577	1.06731	0.51475
23	7.66667	359.20615	1.06673	0.51864
24	8.00000	356.55893	1.06615	0.52253
25	8.33333	353.97174	1.06558	0.52642
26	8.66667	351.44232	1.06501	0.53030
27	9.00000	348.96851	1.06443	0.53419
28	9.33333	346.54825	1.06386	0.53807
29	9.66667	344.17963	1.06329	0.54195

30	10.00000	341.86078	1.06272	0.54582
31	10.33333	339.58990	1.06216	0.54969
32	10.66667	337.36536	1.06159	0.55355
33	11.00000	335.18552	1.06103	0.55741
34	11.33333	333.04886	1.06046	0.56126
35	11.66667	330.95389	1.05990	0.56510
36	12.00000	328.89923	1.05934	0.56894
37	12.33333	326.88354	1.05879	0.57276
38	12.66667	324.90555	1.05823	0.57658
39	13.00000	322.96402	1.05768	0.58039
40	13.33333	321.05780	1.05712	0.58419
41	13.66667	319.18576	1.05657	0.58797
42	14.00000	317.34683	1.05603	0.59175
43	14.33333	315.53998	1.05548	0.59552
44	14.66667	313.76422	1.05494	0.59927
45	15.00000	312.01859	1.05440	0.60301
46	15.33333	310.26617	1.05386	0.60674
47	15.66667	308.49789	1.05332	0.61046
48	16.00000	306.71347	1.05279	0.61417
49	16.33333	304.91260	1.05226	0.61786
50	16.66667	303.09494	1.05173	0.62155
51	17.00000	301.26019	1.05120	0.62522
52	17.33333	299.40799	1.05067	0.62888
53	17.66667	297.53799	1.05015	0.63253
54	18.00000	295.64981	1.04963	0.63616
55	18.33333	293.74310	1.04911	0.63979
56	18.66667	291.81744	1.04859	0.64341
57	19.00000	289.87241	1.04808	0.64701
58	19.33333	287.90759	1.04756	0.65061
59	19.66667	285.92255	1.04705	0.65420
60	20.00000	283.91678	1.04654	0.65777
61	20.33333	281.88983	1.04604	0.66134
62	20.66667	279.84119	1.04553	0.66489
63	21.00000	277.77029	1.04503	0.66844
64	21.33333	275.67661	1.04453	0.67198
65	21.66667	273.55957	1.04403	0.67551
66	22.00000	271.41855	1.04353	0.67902
67	22.33333	269.25290	1.04303	0.68254
68	22.66667	267.06195	1.04254	0.68604
69	23.00000	264.84500	1.04204	0.68953
70	23.33333	262.60132	1.04155	0.69302
71	23.66667	260.33008	1.04106	0.69650
72	24.00000	258.03049	1.04057	0.69997
73	24.33333	255.70166	1.04008	0.70344
74	24.66667	253.44673	1.03960	0.70690
75	25.00000	251.26234	1.03911	0.71035
76	25.33333	249.14465	1.03863	0.71379
77	25.66667	247.09010	1.03815	0.71721
78	26.00000	245.09537	1.03767	0.72063
79	26.33333	243.15739	1.03720	0.72403
80	26.66667	241.27330	1.03672	0.72742
81	27.00000	239.44041	1.03625	0.73080
82	27.33333	237.65623	1.03578	0.73416

83	27.66667	235.91844	1.03532	0.73750
84	28.00000	234.22484	1.03485	0.74083
85	28.33333	232.57339	1.03439	0.74414
86	28.66667	230.96219	1.03394	0.74743
87	29.00000	229.38942	1.03348	0.75070
88	29.33333	227.85339	1.03303	0.75396
89	29.66667	226.35252	1.03258	0.75719
90	30.00000	224.88531	1.03214	0.76040
91	30.33333	223.45035	1.03170	0.76360
92	30.66667	222.04630	1.03126	0.76677
93	31.00000	220.67189	1.03082	0.76992
94	31.33333	219.32596	1.03039	0.77305
95	31.66667	218.00735	1.02996	0.77615
96	32.00000	216.71504	1.02954	0.77923
97	32.33333	215.44798	1.02912	0.78229
98	32.66667	214.20523	1.02870	0.78533
99	33.00000	212.98589	1.02828	0.78834
100	33.33333	211.78908	1.02787	0.79133
101	33.66667	210.61400	1.02747	0.79429
102	34.00000	209.45987	1.02706	0.79723
103	34.33333	208.32594	1.02666	0.80014

Enter a file name of dilution used:d0

Enter a file name of th_0:th_0

Enter a file name of tau:tau

please give the initial density

1.08

please give the initial dilution

0.43

please give the rate of precipitation(I) in g/dm²h

5.64

please give the interval time(delta_t) in second

20

please give the max dilution

0.80

please give the time(temp) in minute to know the dilution values

40

n	time(min)	thickness(micron)	density	dilution
0	0.00000	430.56000	1.08000	0.43000
1	0.33333	427.20020	1.07941	0.43387
2	0.66667	423.86282	1.07883	0.43775
3	1.00000	420.54773	1.07824	0.44164
4	1.33333	417.25479	1.07765	0.44553
5	1.66667	413.98389	1.07706	0.44942
6	2.00000	410.73486	1.07648	0.45333
7	2.33333	407.50763	1.07589	0.45723
8	2.66667	404.30203	1.07530	0.46115
9	3.00000	401.11795	1.07471	0.46506
10	3.33333	397.95526	1.07412	0.46898
11	3.66667	394.81384	1.07353	0.47291
12	4.00000	391.69357	1.07295	0.47684
13	4.33333	388.59433	1.07236	0.48077
14	4.66667	385.51602	1.07177	0.48471
15	5.00000	382.45850	1.07118	0.48865
16	5.33333	379.42163	1.07059	0.49260
17	5.66667	376.40530	1.07001	0.49654
18	6.00000	373.40942	1.06942	0.50049
19	6.33333	370.44067	1.06883	0.50445
20	6.66667	367.54523	1.06825	0.50840
21	7.00000	364.72012	1.06766	0.51236
22	7.33333	361.96255	1.06707	0.51631
23	7.66667	359.26984	1.06649	0.52027
24	8.00000	356.63940	1.06590	0.52422
25	8.33333	354.06891	1.06532	0.52817
26	8.66667	351.55603	1.06474	0.53212
27	9.00000	349.09863	1.06416	0.53607
28	9.33333	346.69464	1.06358	0.54001
29	9.66667	344.34207	1.06300	0.54395
30	10.00000	342.03909	1.06242	0.54788

31	10.33333	339.78391	1.06185	0.55181
32	10.66667	337.57483	1.06127	0.55573
33	11.00000	335.41028	1.06070	0.55964
34	11.33333	333.28867	1.06013	0.56355
35	11.66667	331.20856	1.05956	0.56744
36	12.00000	329.16852	1.05899	0.57133
37	12.33333	327.16724	1.05843	0.57521
38	12.66667	325.20343	1.05787	0.57908
39	13.00000	323.27585	1.05730	0.58294
40	13.33333	321.38336	1.05675	0.58679
41	13.66667	319.52481	1.05619	0.59062
42	14.00000	317.69913	1.05564	0.59445
43	14.33333	315.90530	1.05508	0.59826
44	14.66667	314.14233	1.05453	0.60206
45	15.00000	312.38452	1.05399	0.60585
46	15.33333	310.61047	1.05344	0.60962
47	15.66667	308.81989	1.05290	0.61338
48	16.00000	307.01242	1.05236	0.61713
49	16.33333	305.18777	1.05182	0.62087
50	16.66667	303.34558	1.05129	0.62459
51	17.00000	301.48550	1.05075	0.62831
52	17.33333	299.60718	1.05022	0.63201
53	17.66667	297.71021	1.04970	0.63570
54	18.00000	295.79419	1.04917	0.63938
55	18.33333	293.85873	1.04864	0.64304
56	18.66667	291.90341	1.04812	0.64670
57	19.00000	289.92776	1.04760	0.65034
58	19.33333	287.93134	1.04708	0.65398
59	19.66667	285.91364	1.04657	0.65760
60	20.00000	283.87415	1.04605	0.66121
61	20.33333	281.81235	1.04554	0.66482
62	20.66667	279.72769	1.04503	0.66841
63	21.00000	277.61960	1.04452	0.67199
64	21.33333	275.48746	1.04402	0.67557
65	21.66667	273.33063	1.04351	0.67913
66	22.00000	271.14847	1.04301	0.68268
67	22.33333	268.94025	1.04251	0.68623
68	22.66667	266.70523	1.04201	0.68977
69	23.00000	264.44266	1.04151	0.69330
70	23.33333	262.15170	1.04102	0.69682
71	23.66667	259.83151	1.04052	0.70033
72	24.00000	257.49139	1.04003	0.70384
73	24.33333	255.22675	1.03954	0.70734
74	24.66667	253.03333	1.03905	0.71082
75	25.00000	250.90723	1.03856	0.71430
76	25.33333	248.84482	1.03807	0.71777
77	25.66667	246.84273	1.03759	0.72122
78	26.00000	244.89784	1.03711	0.72466
79	26.33333	243.00723	1.03663	0.72808
80	26.66667	241.16820	1.03616	0.73149
81	27.00000	239.37820	1.03568	0.73489
82	27.33333	237.63489	1.03521	0.73826
83	27.66667	235.93604	1.03474	0.74162

84	28.00000	234.27959	1.03428	0.74496
85	28.33333	232.66359	1.03382	0.74829
86	28.66667	231.08624	1.03336	0.75159
87	29.00000	229.54581	1.03290	0.75487
88	29.33333	228.04070	1.03245	0.75813
89	29.66667	226.56940	1.03200	0.76138
90	30.00000	225.13046	1.03156	0.76460
91	30.33333	223.72256	1.03112	0.76779
92	30.66667	222.34442	1.03068	0.77097
93	31.00000	220.99484	1.03024	0.77412
94	31.33333	219.67270	1.02981	0.77725
95	31.66667	218.37691	1.02938	0.78035
96	32.00000	217.10646	1.02896	0.78343
97	32.33333	215.86038	1.02854	0.78649
98	32.66667	214.63776	1.02812	0.78952
99	33.00000	213.43774	1.02771	0.79253
100	33.33333	212.25949	1.02730	0.79551
101	33.66667	211.10223	1.02689	0.79847
102	34.00000	209.96523	1.02649	0.80139

Enter a file name of dilution used:d0

Enter a file name of th_0:th_0

Enter a file name of tau:tau

please give the initial density

1.08

please give the initial dilution

0.43

please give the rate of precipitation(I) in g/dm²h

5.69

please give the interval time(delta_t) in second

20

please give the max dilution

0.80

please give the time(temp) in minute to know the dilution values

38

n	time(min)	thickness(micron)	density	dilution
0	0.00000	430.56000	1.08000	0.43000
1	0.33333	427.20020	1.07941	0.43391
2	0.66667	423.86279	1.07882	0.43782
3	1.00000	420.54764	1.07822	0.44174
4	1.33333	417.25461	1.07763	0.44566
5	1.66667	413.98355	1.07704	0.44959
6	2.00000	410.73438	1.07644	0.45353
7	2.33333	407.50693	1.07585	0.45747
8	2.66667	404.30112	1.07526	0.46142
9	3.00000	401.11679	1.07467	0.46536
10	3.33333	397.95383	1.07407	0.46932
11	3.66667	394.81210	1.07348	0.47328
12	4.00000	391.69153	1.07289	0.47724
13	4.33333	388.59195	1.07229	0.48120
14	4.66667	385.51324	1.07170	0.48517
15	5.00000	382.45532	1.07111	0.48915
16	5.33333	379.41803	1.07052	0.49312
17	5.66667	376.40128	1.06992	0.49710
18	6.00000	373.40494	1.06933	0.50108
19	6.33333	370.44382	1.06874	0.50507
20	6.66667	367.55600	1.06815	0.50905
21	7.00000	364.73853	1.06756	0.51304
22	7.33333	361.98853	1.06697	0.51702
23	7.66667	359.30334	1.06638	0.52101
24	8.00000	356.68045	1.06579	0.52499
25	8.33333	354.11740	1.06520	0.52897
26	8.66667	351.61194	1.06462	0.53295
27	9.00000	349.16187	1.06403	0.53692
28	9.33333	346.76511	1.06345	0.54089
29	9.66667	344.41971	1.06287	0.54486
30	10.00000	342.12381	1.06229	0.54882

31	10.33333	339.87564	1.06171	0.55277
32	10.66667	337.67349	1.06113	0.55671
33	11.00000	335.51575	1.06055	0.56065
34	11.33333	333.40085	1.05998	0.56458
35	11.66667	331.32736	1.05941	0.56850
36	12.00000	329.29385	1.05884	0.57241
37	12.33333	327.29898	1.05827	0.57632
38	12.66667	325.34149	1.05770	0.58021
39	13.00000	323.42014	1.05714	0.58409
40	13.33333	321.53375	1.05658	0.58796
41	13.66667	319.68121	1.05602	0.59182
42	14.00000	317.86145	1.05546	0.59566
43	14.33333	316.07343	1.05490	0.59950
44	14.66667	314.31616	1.05435	0.60332
45	15.00000	312.54874	1.05380	0.60713
46	15.33333	310.76477	1.05326	0.61092
47	15.66667	308.96393	1.05271	0.61470
48	16.00000	307.14590	1.05217	0.61847
49	16.33333	305.31033	1.05163	0.62223
50	16.66667	303.45688	1.05109	0.62597
51	17.00000	301.58517	1.05055	0.62970
52	17.33333	299.69482	1.05002	0.63342
53	17.66667	297.78543	1.04949	0.63713
54	18.00000	295.85660	1.04896	0.64083
55	18.33333	293.90790	1.04843	0.64451
56	18.66667	291.93890	1.04791	0.64818
57	19.00000	289.94913	1.04739	0.65185
58	19.33333	287.93811	1.04687	0.65550
59	19.66667	285.90533	1.04635	0.65914
60	20.00000	283.85028	1.04583	0.66277
61	20.33333	281.77240	1.04532	0.66639
62	20.66667	279.67111	1.04481	0.67000
63	21.00000	277.54581	1.04430	0.67359
64	21.33333	275.39587	1.04379	0.67718
65	21.66667	273.22064	1.04328	0.68076
66	22.00000	271.01944	1.04278	0.68433
67	22.33333	268.79150	1.04227	0.68790
68	22.66667	266.53607	1.04177	0.69145
69	23.00000	264.25235	1.04127	0.69499
70	23.33333	261.93948	1.04077	0.69853
71	23.66667	259.59656	1.04028	0.70206
72	24.00000	257.28589	1.03978	0.70558
73	24.33333	255.04910	1.03929	0.70909
74	24.66667	252.88206	1.03880	0.71259
75	25.00000	250.78096	1.03831	0.71608
76	25.33333	248.74226	1.03782	0.71956
77	25.66667	246.76270	1.03734	0.72302
78	26.00000	244.83919	1.03686	0.72647
79	26.33333	242.96892	1.03638	0.72990
80	26.66667	241.14923	1.03590	0.73332
81	27.00000	239.37767	1.03543	0.73672
82	27.33333	237.65192	1.03495	0.74011
83	27.66667	235.96980	1.03449	0.74347

84	28.00000	234.32932	1.03402	0.74682
85	28.33333	232.72856	1.03356	0.75015
86	28.66667	231.16576	1.03310	0.75345
87	29.00000	229.63922	1.03264	0.75674
88	29.33333	228.14740	1.03219	0.76001
89	29.66667	226.68880	1.03174	0.76325
90	30.00000	225.26202	1.03130	0.76647
91	30.33333	223.86575	1.03086	0.76967
92	30.66667	222.49875	1.03042	0.77285
93	31.00000	221.15984	1.02998	0.77600
94	31.33333	219.84790	1.02955	0.77913
95	31.66667	218.56190	1.02912	0.78223
96	32.00000	217.30084	1.02870	0.78531
97	32.33333	216.06378	1.02828	0.78836
98	32.66667	214.84981	1.02786	0.79139
99	33.00000	213.65810	1.02745	0.79440
100	33.33333	212.48781	1.02704	0.79738
101	33.66667	211.33820	1.02664	0.80033

Enter a file name of dilution used:d0

Enter a file name of th_0:th_0

Enter a file name of tau:tau

please give the initial density

1.08

please give the initial dilution

0.43

please give the rate of precipitation(I) in g/dm²h

14.40

please give the interval time(delta t) in second

20

please give the max dilution

please

please give the time(temp) in minute to know the dilution values

22

n	time(min)	thickness(micron)	density	dilution
---	-----------	-------------------	---------	----------

0	0.00000	430.56000	1.08000	0.43000
1	0.33333	427.20020	1.07850	0.43990
2	0.66667	423.85687	1.07702	0.44971
3	1.00000	420.53009	1.07556	0.45945
4	1.33333	417.21988	1.07411	0.46910
5	1.66667	413.92630	1.07267	0.47866
6	2.00000	410.64938	1.07126	0.48814
7	2.33333	407.38916	1.06986	0.49754
8	2.66667	404.14572	1.06848	0.50685
9	3.00000	401.01889	1.06711	0.51607
10	3.33333	398.03262	1.06576	0.52519
11	3.66667	395.17468	1.06443	0.53422
12	4.00000	392.43433	1.06312	0.54315
13	4.33333	389.80203	1.06182	0.55198
14	4.66667	387.26935	1.06054	0.56071
15	5.00000	384.82874	1.05929	0.56933
16	5.33333	382.47339	1.05805	0.57784
17	5.66667	380.19727	1.05682	0.58625
18	6.00000	377.99487	1.05562	0.59455
19	6.33333	375.86124	1.05444	0.60273
20	6.66667	373.75259	1.05327	0.61080
21	7.00000	371.58777	1.05213	0.61877
22	7.33333	369.36435	1.05100	0.62662
23	7.66667	367.07974	1.04989	0.63437
24	8.00000	364.73117	1.04879	0.64202
25	8.33333	362.31564	1.04771	0.64956
26	8.66667	359.82999	1.04665	0.65701
27	9.00000	357.27072	1.04561	0.66435
28	9.33333	354.63412	1.04458	0.67160
29	9.66667	351.91614	1.04357	0.67876

30	10.00000	349.11237	1.04257	0.68582
31	10.33333	346.21799	1.04158	0.69279
32	10.66667	343.22778	1.04061	0.69967
33	11.00000	340.13596	1.03966	0.70646
34	11.33333	337.19601	1.03872	0.71317
35	11.66667	334.40451	1.03779	0.71978
36	12.00000	331.74677	1.03688	0.72630
37	12.33333	329.21005	1.03598	0.73272
38	12.66667	326.78336	1.03510	0.73904
39	13.00000	324.45697	1.03424	0.74526
40	13.33333	322.22244	1.03339	0.75138
41	13.66667	320.07224	1.03255	0.75740
42	14.00000	317.99966	1.03173	0.76331
43	14.33333	315.99878	1.03093	0.76913
44	14.66667	314.06430	1.03014	0.77483
45	15.00000	312.19144	1.02937	0.78044
46	15.33333	310.37589	1.02861	0.78594
47	15.66667	308.61377	1.02787	0.79134
48	16.00000	306.90158	1.02715	0.79664
49	16.33333	305.23611	1.02643	0.80183

Enter a file name of dilution used:d0

Enter a file name of th_0:th_0

Enter a file name of tau:tau

please give the initial density

1.08

please give the initial dilution

0.43

please give the rate of precipitation(I) in g/dm²h

23.63

please give the interval time(delta_t) in second

20

please give the max dilution

0.80

please give the time(temp) in minute to know the dilution values

18

n	time(min)	thickness(micron)	density	dilution
0	0.00000	430.56000	1.08000	0.43000
1	0.33333	427.20020	1.07754	0.44626
2	0.66667	423.85059	1.07514	0.46221
3	1.00000	420.51151	1.07279	0.47786
4	1.33333	417.18326	1.07050	0.49321
5	1.66667	413.86615	1.06827	0.50825
6	2.00000	410.68304	1.06608	0.52300
7	2.33333	407.70868	1.06396	0.53743
8	2.66667	404.91541	1.06188	0.55156
9	3.00000	402.28055	1.05986	0.56537
10	3.33333	399.78531	1.05790	0.57886
11	3.66667	397.41394	1.05599	0.59203
12	4.00000	395.15317	1.05413	0.60489
13	4.33333	392.91751	1.05232	0.61743
14	4.66667	390.57941	1.05056	0.62967
15	5.00000	388.13156	1.04885	0.64161
16	5.33333	385.56586	1.04719	0.65327
17	5.66667	382.87326	1.04557	0.66464
18	6.00000	380.04361	1.04399	0.67573
19	6.33333	377.06549	1.04246	0.68656
20	6.66667	373.92590	1.04097	0.69713
21	7.00000	370.61002	1.03952	0.70745
22	7.33333	367.42746	1.03811	0.71752
23	7.66667	364.46689	1.03674	0.72734
24	8.00000	361.69678	1.03540	0.73690
25	8.33333	359.09164	1.03411	0.74620
26	8.66667	356.63065	1.03285	0.75524
27	9.00000	354.29657	1.03164	0.76403
28	9.33333	352.07498	1.03046	0.77257
29	9.66667	349.95367	1.02931	0.78086
30	10.00000	347.92230	1.02821	0.78890
31	10.33333	345.97198	1.02714	0.79670

32 10.66667 344.09500 1.02610 0.80426