

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

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

PAR

XIAOFEI WANG

ÉVALUATION AÉRODYNAMIQUE DES FLUIDES DÉGIVRANTS ET ANTIGIVRE
DILUÉS ET CONTAMINÉS PAR LA GLACE ET LA NEIGE

MAI 1999



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

De façon à assurer des décollages sécuritaires dans les aéroports nordiques, on dégivre et on prévient la formation de glace sur les avions en attente de décollage par l'application de produits dégivrants et antigivre. Même si ces produits s'éliminent en majeure partie pendant la période d'accélération précédant l'envol, le film résiduel encore en place sur l'aile au moment du décollage contribue à réduire la portance de l'avion et en augmenter la traînée, plus particulièrement lorsqu'il décolle lors de tempêtes de neige et de verglas.

Le présent mémoire présente les résultats d'une étude expérimentale visant à faire ressortir les effets perturbateurs aérodynamiques déterminés à partir de l'épaisseur de la couche limite (ECDL) au-dessus du fluide résiduel lorsque ce dernier est contaminé par deux types de précipitations, soit la bruine verglaçante et la neige. À cette fin, on a comparé lors d'un décollage simulé les caractéristiques d'élimination d'une couche de fluide de 1,5 mm d'épaisseur dans trois conditions de contamination - prédilution, bruine verglaçante et neige. Les essais aérodynamiques ont été effectués avec quatre produits commerciaux certifiés, deux dégivrants de type I offrant une protection limitée à quelques minutes et deux fluides antigivre de type II et IV présentant des temps de

protection respectifs de moyenne et longue durée. Un fluide de référence a été également utilisé pour fin d'étalonnage.

Les essais aérodynamiques réalisés sont semblables aux essais normalisés utilisés pour la certification des produits commerciaux; leur particularité vient de ce qu'ils ont été réalisés dans une soufflerie mobile de petite dimension opérée à l'intérieur d'une chambre climatique maintenue à température constante. La paroi du haut de la soufflerie s'ouvre pour permettre l'exposition sur toute la surface d'essai du fluide candidat aux gouttelettes surfondues de 150 µm simulant la bruine verglaçante ou aux flocons de neige distribués à la main. Les différents niveaux de dilution retenues, compris entre 0 et 70 %, reproduisent les effets de la dilution dynamique occasionnée dans le fluide résiduel au moment du décollage par les particules de glace ou les gouttelettes surfondues. Les pourcentages de dilution sont les valeurs calculées à partir de l'intensité et la durée de la bruine verglaçante ou de la masse totale de neige distribuée dans une couche de fluide d'épaisseur connue. L'acceptabilité aérodynamique des produits est déterminée lors du décollage simulé, comme dans l'essai aérodynamique normalisé, à partir de la valeur de l'ECDL mesurée à 30 secondes.

Les produits commerciaux soumis aux essais présentent des comportements aérodynamiques différents selon le type de fluide, la température de l'essai, le niveau de dilution et la nature de la contamination. Les deux fluides

dégivrants de type I, se sont montrés acceptables à -10 °C sur le plan aérodynamique avec des valeurs de l'ECDL comparables à l'erreur expérimentale jusqu'à ce que soient atteints des niveaux de dilution de 50 % où le mélange avoisine alors le point de congélation; en haut de 50 %, il y a formation, avant ou durant l'essai, de «névasse», constituée d'un mélange hétérogène de glace et de fluide, qui fait augmenter brusquement les valeurs de l'ECDL. À -20 °C, le comportement est similaire sauf que la «névasse» commence à se former à des pourcentages de dilution aussi faibles que 20 %. Pour sa part, le produit antigivre de type II de moyenne durée ne s'est pas montré acceptable sur le plan aérodynamique à -10 °C et à -20 °C alors que le fluide de type IV offrant la meilleure protection est acceptable jusqu'à ce que de la «névasse» commence à se former, plus précisément à partir de 70 % de dilution à -10 °C et de 50 % à -20 °C.

Avec les quatre produits commerciaux étudiés, la diminution de la performance aérodynamique caractérisée par la brusque augmentation de l'ECDL a toujours été confirmée par l'observation visuelle de plaquettes de «névasse» formée avant ou au cours de l'essais. La rugosité créée par la «névasse» formée en surface perturbe la couche limite à l'interface entre l'air et le fluide, augmentant alors considérablement la valeur de l'EDCL

Avec les produits de type I, aucune différence significative sur le plan aérodynamique n'a été observée avec les trois types de contamination correspondant à l'état prédilué, ou après exposition aux gouttelettes surfondues et à la neige. Avec les produits de types II, les valeurs les plus élevées de l'ECDL sont celles obtenues avec la neige tandis que les plus faibles sont celles mesurées avec le produit à l'état prédilué. Avec la bruine verglaçante, les valeurs de l'EDCL mesurée avec les produits de types II et IV sont proches de celles du fluide prédilué. Les fluides prédilués constituent des solutions parfaitement homogènes. La «névasse» va s'y former par plaquettes aux endroits où la température du fluide dilué avoisine le point de fusion; ces dernières gèlent alors de façon spontanée.

Dans le cas des produits exposés aux gouttelettes surfondues et aux particules de neige, les temps de diffusion des gouttelettes surfondues et de dissolution des particules de neige sont relativement courts, étant limités à la période de temps allant du début de l'exposition à la précipitation au démarrage de l'essai. Le fluide devient non homogène, étant plus dilué en surface qu'en profondeur, favorisant alors le développement de «névasse» en surface à un niveau de dilution plus faible qu'avec un fluide homogène. Sur la base de ces résultats, l'acceptabilité aérodynamique du fluide ne serait pas bien évaluée dans les tests standards effectués avec seulement les fluides prédilués, en particulier,

pour les fluides antigivre offrant une protection de moyenne et longue durées. Si le fluide résiduel prédilué au moment de l'envol est parfaitement homogène, le fluide dilué dynamiquement, i.e. contaminé par les précipitations glacées, est hétérogène, ce qui affecte son comportement aérodynamique en raison de la plus grande rugosité de surface qui s'y développe à l'interface air-fluide.

À mes parents.

À ma petite famille, ma femme Shan Yang,
ma fille Wenjia et mon fils Simon.

Remerciements

J'exprime mes sincères sentiments de reconnaissances à mon directeur de recherche, le docteur Jean Louis Laforte, professeur titulaire au département des Sciences Appliquées, et responsable du LIMA (Laboratoire International des Matériaux Antigivre) à l'Université du Québec à Chicoutimi, pour sa supervision judicieuse et son soutien indispensable.

J'aimerais également remercier Mme Sylvie Bernardin, gérante du LIMA, pour sa direction et nombreux conseils. Je remercie également tout le personnel du LIMA pour leur aide très appréciée, et tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont aidé dans ce travail.

Table des matières

Résumé	ii
Remerciements	vii
Table des matières	viii
Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xiii
Liste des photos	xiv
Liste des annexes	xv
Liste des symboles	xvi
Liste des abréviations.....	xviii
 CHAPITRE 1	 1
1. Introduction	1
1.1 Problématique	2
1.2 Historique	4
1.3 Objectifs	7
1.4 Plan du travail.....	8
 CHAPITRE 2	 11
2. Expérimentation	11
2.1 Théorie et définitions	11
2.1.1 Notion de couche limite (CL).....	11
2.1.2 Épaisseur du déplacement de la couche limite (EDCL).....	12
2.1.3 Type de couches limites	14
2.2 Description de la chambre climatique.....	14
2.2.1 Configuration.....	14
2.2.2 Conditions climatiques simulées	16
2.2.2.1 Génération de la bruine verglaçante.....	16
2.2.2.2 Application de la neige.....	18
2.3 Description du BLDT-mètre	19
2.3.1 Installation générale.....	19
2.3.2 Veine d'essai.....	22
2.3.3 Accessoires du BLDT-mètre	23
2.4 Paramètres expérimentaux.....	25
2.4.1 Mesure des pressions.....	25

2.4.2 Mesure des vitesses	25
2.4.3 Mesures de la température et l'humidité relative	26
2.4.4 Mesure de l'EDCL ou δ^*	26
2.4.5 Contrôle du mini-tunnel et traitement des données	31
2.5 Procédures expérimentales	33
2.5.1 Manipulations.....	33
2.5.2 Choix de l'épaisseur initiale du fluide.....	33
2.5.3 Effet de la température d'application	35
2.5.4 Cas des fluides prédilués.....	37
2.5.5 Contamination par la bruine verglaçante	38
2.5.6 Cas de la neige	42
2.5.7 Test d'élimination	42
 CHAPITRE 3	45
3. Résultats expérimentaux.....	45
3.1 Identifications des produits	45
3.2 Étalonnage et acceptabilité	47
3.3 Dilution et contamination à -10 °C	48
3.3.1 Produits de type I à -10 °C.....	49
3.3.2 Produits de type II et IV à -10 °C	51
3.3.3 Point de congélation et formation de «névasse»	53
3.4 Essais à -20 °C.....	58
3.4.1 Produits de type I, II et IV à -20 °C	58
3.4.2 Point de congélation et formation de «névasse»	62
3.5 Essai avec «névasse» artificielle	65
 CHAPITRE 4	69
4. Discussion des résultats.....	69
4.1 Dynamique du fluide lors de son élimination	69
4.1.1 Première période	69
4.1.2 Seconde période.....	70
4.1.3 Troisième période	70
4.1.4 Quatrième période	72
4.2 Performance aérodynamique au moment du décollage	78
4.2.1 Prédilution	78
4.2.2 Dilution dynamique	78
4.2.2.1 Contamination par la neige	80
4.3 Formation de la «névasse»	81

4.3.1 Cas du fluide prédilué sans contamination extérieure	81
4.3.2 Cas de la bruine.....	82
4.4 Dissolution de particules de glace	85
 CHAPITRE 5	 89
5. Conclusion.....	89
Bibliographie.....	93

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Paramètres expérimentaux de la bruine verglaçante	17
Tableau 2.2 Dimensions de la conduite d'essai	23
Tableau 2.3 Uniformité de l'intensité de givrage (g/dm ² /h) sous bruine verglaçante	38
Tableau 2.4 Relation entre le temps d'exposition et le pourcentage de dilution à un taux de précipitation de 24 g/dm ² /h.....	40
Tableau 3.1 Identification des fluides soumis aux essais	46
Tableau 3.2 Pourcentage de dilution à laquelle se forment les premières plaquettes de «névasse» à -10 °C (%).....	56
Tableau 3.3 Pourcentage de dilution à partir duquel la limite d'acceptabilité est excédée	61
Tableau 3.4 Pourcentage de dilution à laquelle se forme la première plaquette de «névasse» à -20 °C	63
Tableau 4.1 Pourcentage d'éliminations obtenues à -10 °C	71
Tableau 4.2 Durées T et vitesses V caractérisant les quatre périodes observées avec l'échantillon I-A contaminé par la neige à -10 °C ...	73
Tableau 4.3 Temps et vitesses caractérisant les quatre périodes d'élimination...	74
Tableau 4.4 État du fluide I-A contaminé avec la bruine et la neige	80
Tableau 4.5 Coefficient de diffusion de l'eau dans les fluides étudiés	83
Tableau 4.6 Valeurs estimées des temps de diffusion requis pour obtenir un film constituant mélange homogène.....	84
Tableau 4.7 Variation de température (T _f - T _a) observée avec le produit I-A à -10 °C lors de l'essai d'élimination	86
Tableau A.1 Identification des échantillons soumis aux essais	97
Tableau A.2 Effet de la masse de «névasse» appliquée (échantillons II-C, II-C 50/50, IV-D)	98
Tableau A.3 Effet de la masse de «névasse» appliquée (échantillon I-A)	99
Tableau B.1 Signification des symboles	101
Tableau B.2 Effet du temps d'attente après application de la neige : échantillon II-C	104
Tableau B.3 Effet d'une application unique de neige : échantillon II-C	105
Tableau B.4 Effet de la densité de la neige appliquée : échantillon II-C	106
Tableau B.5 Effet de l'épaisseur du fluide (tel que reçu et prédilué)	107

Tableau B.6 Effet de l'épaisseur du fluide (cas de la bruine)	108
Tableau B.7 Essai sans fluide appliqué.....	109
Tableau B.8 Étalonnage à sec et avec le fluide référence	110
Tableau C.1 Effet de la dilution homogène (échantillon I-A à –10 °C)	112
Tableau C.2 Effet de la dilution homogène (échantillon I-A à –20 °C)	113
Tableau C.3 Effet de la bruine verglaçante (échantillon I-A à –10 °C)	114
Tableau C.4 Effet de la bruine verglaçante (échantillon I-A à –20 °C)	115
Tableau C.5 Effet de la contamination par la neige (échantillon I-A à –10 °C) ..	116
Tableau C.6 Effet de la contamination par la neige (échantillon I-A à –20 °C) ..	117
Tableau D.1 Effet de la dilution homogène (échantillon I-B à –10 °C)	119
Tableau D.2 Effet de la dilution homogène (échantillon I-B à –20 °C)	120
Tableau D.3 Effet de la contamination par la bruine verglaçante (échantillon I-B à –10 °C)	121
Tableau D.4 Effet de la contamination par la bruine verglaçante (échantillon I-B à –20 °C)	122
Tableau D.5 Effet de la contamination par la neige (échantillon I-B à –10 °C) ..	123
Tableau D.6 Effet de la contamination par la neige (échantillon I-B à –20 °C) ..	124
Tableau E.1 Effet de la dilution homogène (échantillon II-C à –10 °C)	126
Tableau E.2 Effet de la dilution homogène (échantillon II-C à –20 °C)	127
Tableau E.3 Effet de la bruine verglaçante (échantillon II-C à –10 °C)	128
Tableau E.4 Effet de la bruine verglaçante (échantillon II-C à –20 °C)	129
Tableau E.5 Effet de la contamination par la neige (échantillon II-C à –10 °C) .	130
Tableau E.6 Effet de la contamination par la neige (échantillon II-C à –20 °C) .	131
Tableau F.1 Effet de la dilution homogène (échantillon IV-D à –10 °C)	133
Tableau F.2 Effet de la dilution homogène (échantillon IV-D à –20 °C)	134
Tableau F.3 Effet de la bruine verglaçante (échantillon IV-D à –10 °C)	135
Tableau F.4 Effet de la bruine verglaçante (échantillon IV-D à –20 °C)	136
Tableau F.5 Effet de la contamination par la neige (échantillon IV-D à –10 °C) 137	
Tableau F.6 Effet de la contamination par la neige (échantillon IV-D à –20 °C) 138	
Tableau G.1 Coefficient de diffusion de l'eau dans le fluide (échantillon I-A)	140
Tableau G.2 Coefficient de diffusion de l'eau dans le fluide (échantillon I-B)	141
Tableau G.3 Coefficient de diffusion de l'eau dans le fluide (échantillon II-C)	142
Tableau G.4 Coefficient de diffusion de l'eau dans le fluide (échantillon IV-D)... 143	
Tableau G.5 Coefficient de diffusion de l'eau dans le fluide (propylène glycol) .. 144	
Tableau G.6 Coefficient de diffusion de l'eau dans le fluide (éthylène glycol) 145	

Liste des figures

Figure 2.1 Définition de l'EDCL (δ^*).....	13
Figure 2.2 Chambre climatique 4M	15
Figure 2.3 Schéma du système hydraulique de production de la bruine verglaçante.....	18
Figure 2.4 Schéma du BLDT-mètre utilisé	21
Figure 2.5 Dimensions de la conduite d'essai	22
Figure 2.6 EDCL sur les parois de la section d'essai	27
Figure 2.7 Effet de l'épaisseur initiale du fluide sur l'EDCL à 30 s mesurée à -10 °C	35
Figure 2.8 EDCL fonction du temps avec le fluide référence à -10 °C	44
Figure 3.1 Limites d'acceptabilité en fonction de la température	48
Figure 3.2 EDCL à 30 s mesuré à -10 °C en fonction de la dilution du fluide	50
Figure 3.3 EDCL à 30 s mesuré à -10 °C en fonction de la dilution du fluide	52
Figure 3.4 EDCL à 30 s mesuré à -20 °C en fonction de la dilution du fluide	59
Figure 3.5 EDCL à 30 s mesuré à -20 °C en fonction de la dilution du fluide	60
Figure 3.6 EDCL en fonction de la masse de la projection de «névasse»	67
Figure 4.1 δ^* (max) et δ^* (30 s) en fonction du niveau de dilution	77
Figure 4.2 Température de congélation en fonction du pourcentage.....	88
Figure G.1 Diffusion de l'eau en fonction du pourcentage de dilution (échantillon I-A)	140
Figure G.2 Diffusion de l'eau en fonction du pourcentage de dilution (échantillon I-B)	141
Figure G.3 Diffusion de l'eau en fonction du pourcentage de dilution (échantillon II-C)	142
Figure G.4 Diffusion de l'eau en fonction du pourcentage de dilution (échantillon IV-D).....	143
Figure G.5 Diffusion de l'eau en fonction du pourcentage de dilution (échantillon PG).....	144
Figure G.6 Diffusion de l'eau en fonction du pourcentage de dilution (échantillon ÉG).....	145

Liste des photos

Photo 2.1 Panneau de contrôle du système de génération de la bruine verglaçante	17
Photo 2.2 BLDT-mètre	20
Photo 2.3 Matériel et accessoires	24
Photo 2.4 Niveleurs	24
Photo 2.5 Instruments de l'acquisition et le traitement	32
Photo 2.6 Seringue servant à appliquer les faibles quantités de fluide	41
Photo 3.1 «Névasse» formée par contamination par la neige à -10 °C (D 70 %)	54
Photo 3.2 Produit II-C contaminé par la bruine verglaçante à -20 °C (D 40 %)....	57
Photo 3.3 Produit I-A contaminé par la neige à -20 °C (D 40 %)	57
Photo B Photographies montrant l'état du fluide	102
Photo B.1 État liquide homogène : L.....	102
Photo B.2 Mélange de liquide et de «névasse» moyenne : L+S(m).....	102
Photo B.3 Mélange de liquide et de beaucoup de «névasse» : L+S(b)	102
Photo B.4 Mélange de liquide, de faible «névasse» et de beaucoup de neige : L+S(p)+n(b).....	102
Photo B.5 Faible «névasse» : S(p).....	103
Photo B.6 «névasse» moyenne : S(m).....	103
Photo B.7 Beaucoup de «névasse» : S(b)	103
Photo B.8 Mélange d'un peu de neige et de beaucoup de «névasse» : n(p)+S(b).....	103

Liste des annexes

Annexe A Paramètres des essais d'élimination : essai avec «névasse» artificielle	96
Annexe B Paramètres des essais d'élimination : effets de différents facteurs ..	100
Annexe C Paramètres des essais d'élimination : échantillon I-A.....	111
Annexe D Paramètres des essais d'élimination : échantillon I-B.....	118
Annexe E Paramètres des essais d'élimination : échantillon II-C.....	125
Annexe F Paramètres des essais d'élimination : échantillon IV-D	132
Annexe G Valeurs mesurées des coefficients de diffusion de l'eau dans le fluide	139

Liste des symboles

τ	Temps d'attente (inclus le temps pour l'application de la neige)	min.
σ	Écart-type	
$\varepsilon(0)$	Épaisseur du fluide mesurée après l'application du fluide et l'exposition à la neige ou la bruine	μm
$\varepsilon(f)$	Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination	μm
δ^*	Valeur de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes	mm
ΔP	Différence en pression	P_a
A	Essai à la température de 0 °C	
a, b, c,...m, etc.	La lettre correspond à l'ordre chronologique suivi dans la séquence d'essai	
b	Beaucoup	
B	Essai avec contamination avec la bruine	
C	Essai à la température de -10 °C	
D	Pourcentage de dilution	%
DRY	Essai dans la condition sèche (sans fluide)	
E	Pourcentage d'élimination du fluide	%
F	Essai à la température de -25 °C	
L	Liquide homogène	
$L+S(b)+n(p)$	Liquide+beaucoup de «névasse»+peu de neige	
$L+S(m)+n(m)$	Liquide + quantité moyenne de «névasse» + neige moyenne	

L+S(p)	Liquide + peu de «névasse»	
M	masse de «névasse»	g
MIL	fluide de référence	
n	Neige	
N	échantillon contaminé par la neige	
p	Peu	
P	essai avec projection de «névasse» artificielle	
P_1	Pression statique, mesurée en aval du convergent	
P_2	Pression statique mesurée à l'entrée du conduit	
P_3	Pression statique mesurée à la sortie du conduit	
$P_{②}$	Capteur de pression P_2 .	
$P_{③}$	Capteur de pression P_3	
P_0	État du fluide avant l'application de la neige (bruine)	
P_1	État du fluide après l'application de la neige (bruine)	
P_2	État du fluide après l'essai d'élimination	
R_e	Nombre de Reynolds	
Rh	Pourcentage d'humidité relative	%
S	«Névasse»	
s	essai de l'effet de l'épaisseur du fluide	
$S+n$	«Névasse» + neige	
t	Temps	s
T_a	Température de l'air	°C
T_f	Température du fluide	°C

Liste des abréviations

EDCL	Épaisseur du déplacement de la couche limite.
DVM	Diamètre volumique médian.
FAA	Federal Aviation Administration.
HHET	Essai d'endurance à l'humidité extrême.
WSET	Essai d'endurance sous jet d'eau pulvérisée.
AEA	Association des lignes aériennes européennes.
TC	Transport Canada.
CL	Couche limite.
LIMA	Laboratoire international des matériaux antigivre.
VKI	L'institut Von Karman (Von Karman Institute for fluid mechanics).

CHAPITRE 1

1. Introduction

Les accumulations de glace atmosphérique sur les avions pendant l'hiver (gelée, givre, neige, verglas, etc.), peuvent occasionner des pertes de portance importantes lors du décollage. Afin de pouvoir permettre aux avions de décoller en toute sécurité même en condition de précipitations glacées, on utilise depuis plusieurs années des dégivrants pour enlever la glace déposée et des fluides antigivre pour les protéger jusqu'au moment du décollage. Afin de s'assurer que le fluide résiduel ne provoque pas lui-même une perte de portance au décollage, les produits commerciaux doivent être soumis à des tests de qualification aérodynamique. Pour cette qualification, les produits sont testés purs et prédilués. Les tests avec les fluides prédilués sont supposés représenter d'une part le fluide aux concentrations de glycol qui sont utilisés et d'autre part l'état d'un fluide contaminé par des précipitations glacées. Toutefois, aucune étude n'a été faite pour valider cette hypothèse. L'objectif du travail de recherche présenté dans ce mémoire est de comparer les pertes de portance provoquées par un fluide prédilué à celles obtenues avec le même fluide, mais contaminé par des précipitations glacées.

1.1 Problématique

Les règlements de la “Federal Aviation Administration” (FAA) et de Transport Canada (TC) exigent que toutes les surfaces des avions soient propres au moment du décollage (“clean wing concept”). Cependant, par ce règlement spécial, la FAA accepte qu'un faible quantité de fluide dégivrant ou antigivre reste sur l'avion, à condition que des tests faits dans un laboratoire qualifié démontrent que la quantité de fluide résiduel sur une aile entraîne une perte de portance tolérable. Pour que la perte de portance provoquée par un fluide soit tolérable, deux conditions doivent être satisfaites. Premièrement, la plus grande partie du fluide ($> 80\%$) doit quitter la surface de l'aile pendant la période d'accélération précédant le décollage. Deuxièmement, la perte de portance, induite par la rugosité de la surface causée par la présence du fluide résiduel au moment de la rotation de l'avion, doit être inférieure à une limite prédéfinie. En effet, le processus d'élimination du fluide pendant l'accélération, entraîne la formation de vaguelettes à la surface du fluide. Ce sont ces vaguelettes qui vont provoquer une perte de portance élevée plutôt que l'épaisseur du fluide. La perte de portance d'une aile d'avion a été corrélée avec l'épaisseur de déplacement de la couche limite (EDCL) qui se développe lors de l'élimination durant un décollage simulé d'une couche de fluide sur une plaque plane horizontale (AEA, 1990). Seulement deux laboratoires dans le monde sont qualifiés pour faire ce type de tests, celui de

l'Université du Québec à Chicoutimi au Canada et celui de l'Institut Von Karman (VKI) en Belgique. Tous les fluides commerciaux homologués sont donc testés dans l'un de ces laboratoires pour évaluer la perte de portance qu'ils provoquent au moment du décollage. Actuellement, ces fluides sont testés concentrés et prédilués. Les prédilutions utilisées dans ces essais correspondent aux ratios de 75/25 (75 % fluide et 25 % eau) et 50/50 (50 % fluide et 50 % eau), soit les deux niveaux usuels de dilution des produits lorsqu'ils sont appliqués sur l'avion. Entre le moment où un avion a subi une application de fluide, et le moment du décollage, il y a une période d'attente plus ou moins longue pendant laquelle l'avion peut être soumis à des précipitations glacées. Le fluide recouvrant l'avion sera alors dilué. Or, l'évaluation aérodynamique en laboratoire des fluides ainsi prédilués est considérée comme un indicateur de la perte de portance des fluides d'une part aux concentrations où ils sont utilisés et d'autre part lors de la dilution occasionnée par des précipitations glacées. Jusqu'à maintenant, aucune étude n'a été effectuée sur la pertinence de simuler la dilution d'un fluide contaminé par une prédilution du fluide.

Le présent travail de recherche se propose de vérifier si les essais normalisés avec seulement les fluides dilués peuvent être représentatifs des essais avec les fluides contaminés par la glace. Cette vérification permettra

également de mieux comprendre les phénomènes en jeu lors de la dilution dynamique du film de fluide résiduel lors du décollage sous précipitation.

1.2 Historique

Les méthodes modernes de dégivrage impliquent l'utilisation de deux types de fluides qui sont appliqués sur toute la surface des avions au sol : les produits dégivrants, qui sont utilisés pour enlever les dépôts de glace et les produits antigivre, pour empêcher toute formation de glace. Les produits dégivrants qui regroupent des fluides de type I ont un temps de protection minimal de cinq minutes tel que soumis au test normalisé à l'eau pulvérisée. Ils sont chauffés à environ 75 °C, avant d'être gicrés avec une forte pression sur l'avion (Perron, 1993). Les produits antigivre regroupent des fluides non-newtoniens de type II, III ou IV. Lorsque soumis au test normalisé à l'eau pulvérisée, ils ont des temps de protection supérieurs à 20 minutes. Ils sont appliqués à température ambiante au moyen de gicleurs alimentés avec une pompe spéciale pour ne pas diminuer leur viscosité. Les quatre types de produits sont des liquides conçus pour diminuer le point de congélation en bas de celui de l'eau.

Après la seconde guerre mondiale, seuls les produits de dégivrage étaient utilisés. Ces fluides, dont la composition typique est de 50 % d'eau et 50 % de

glycol, présentaient un faible viscosité. Cependant, leur capacité de résistance à la formation de glace restait limitée, généralement inférieure à 3 minutes. Pour éviter les dégivrages fréquents, des fluides antigivres ont été développés afin d'obtenir une plus longue résistance à la formation de glace. On ne peut effectuer avant le décollage un nettoyage préalable du fluide résiduel, car il y aurait encore un risque de formation de glace entre l'instant du nettoyage et l'instant du décollage. Or, les fluides antigivre sont très visqueux et, bien que de nature pseudo-plastique, ils ne sont pas entièrement éliminés au cours de l'accélération au sol avant le décollement des roues de l'avion (Carbonaro et al., 1985). En conséquence, l'aile est contaminée et le problème de perturbation de la portance se pose de nouveau (Carbonaro, 1986).

Les temps de protection des produits dégivrants et antigivre sont évalués dans deux tests de laboratoire qui simulent deux conditions différentes de givrage. Le "Water Spray Endurance Test" (WSET) ou l'essai d'endurance sous jet d'eau pulvérisée est effectué dans des conditions simulant le brouillard givrant et le "High Humidity Endurance Test" (HHET) ou l'essai d'endurance à l'humidité extrême est effectué dans des conditions de forte humidité simulant la gelée nocturne.

En plus de la performance relative aux temps de protection, les produits commerciaux doivent subir des tests aérodynamiques en soufflerie pour s'assurer

de leur acceptabilité aérodynamique dans l'intervalle de température où ils sont utilisés, soit entre 0 °C et -45 °C.

Mario Carbonaro, de l'Institut Von Karman (VKI), a effectué en laboratoire des tests sur plaque plane (Carbonaro, 1985) et sur un modèle réduit d'aile (Carbonaro, 1986 et 1987). Ces essais ont permis d'obtenir une corrélation de la perte de portance en fonction de l'EDCL mesuré avec des épaisseurs initiales de fluide de 1, 2 et 3 mm.

D'autres études ont montré que la perte de portance occasionnée par les fluides antigivre sur les ailes, au moment du décollage, peut être de l'ordre de 10 % sur les gros transporteurs aériens (B737, DC10, Airbus, etc.) (Carbonaro, 1986; Runyan et al., 1989) et de 20 % sur les avions de type commuteurs à vitesse de décollage plus basse (Ellis et al., 1991). Une variation de la portance est nécessairement due à une modification de la distribution des pressions autour de l'aile. Cette dernière dépend des caractéristiques géométriques et dynamiques de la couche limite qui est une mince couche d'air à la surface de l'aile dans laquelle la vitesse relative de l'avion devient nulle.

Des tests en vol, réalisés en hiver 1988, à Kuopio en Finlande, par la compagnie Boeing et l'association des lignes aériennes européennes (AEA), ont indiqué l'existence de réduction de la portance de l'avion au décollage (Runyan et

al., 1989) due au fluide. Les tests en soufflerie réfrigérée (Hill and Zierten, 1990), qui ont été effectués sur des modèles d'ailes bidimensionnelles et tridimensionnelles, au centre de recherche Lewis à la NASA (NLRC), à l'institut Von Karman (VKI) à Bruxelles, ainsi qu'au laboratoire BFA à Vienne, ont confirmé également l'existence d'une perte de la portance et d'un gain de la traînée occasionnée par le film de fluide résiduel.

En 1988, un laboratoire spécialisé dans l'étude de la performance de ces produits a été mis en place à l'Université du Québec à Chicoutimi.

C'est dans ce laboratoire, en collaboration avec les organismes responsables de la sécurité aérienne, qu'un essai normalisé a été mis au point pour l'évaluation de la performance aérodynamique de ces produits. Cet essai est effectué sur une plaque plane, recouverte d'un film de fluide qui est éliminé lors d'un décollage simulé. Il permet de déterminer l'épaisseur de déplacement de la couche limite (EDCL). Cette dernière est corrélée avec la perte de portance et le gain de la traînée.

1.3 Objectifs

L'objectif principal de ce travail de recherche est de vérifier si la perte de portance due au fluide résiduel évaluée à partir de la mesure de l'EDCL est

différente selon que le fluide est prédilué ou dilué dynamiquement. Le travail étudie en premier lieu les fluides à différentes dilutions sans contamination par la glace. Ces mêmes produits sont ensuite étudiés en dilution dynamique par la glace atmosphérique. Une comparaison des résultats obtenus en présence de glace avec ceux des fluides prédilués, permet de déterminer l'effet de la contamination dynamique sur la performance aérodynamique.

1.4 Plan du travail

Ce programme comporte quatre étapes principales correspondant chacune à une série d'essais d'élimination effectués avec les fluides dans différents états de dilution et de contamination par la glace.

- Série 1 : Prédilution des fluides avec de l'eau déminéralisée ASTM grade IV.
- Série 2 : Contamination des fluides par les gouttelettes surfondues de bruine verglaçante.
- Série 3 : Contamination des fluides par la neige naturelle.
- Série 4 : Contamination par la projection de bouillie de glace ou «névasse» sur le film de fluide.

Quatre fluides commerciaux, (les caractéristiques des produits testés sont détaillées au chapitre 3), ont été utilisés : deux dégivrants de type I et deux antigivre, un de type II et un de type IV. Les tests ont été effectués à deux températures : -10 °C et à -20 °C. Les niveaux de dilutions, pour les fluides prédilués, varient de 0 % au pourcentage de dilution auquel le fluide prédilué gèle à la température du test. Deux types de précipitations sont simulés : la bruine verglaçante et la neige. L'intensité des précipitations simulées est de 24 g/dm²/h.

Le chapitre 2 décrit la procédure expérimentale ainsi que les équipements utilisés pour mesurer la performance aérodynamique des produits dilués et contaminés par la bruine et la neige. Ainsi les méthodes de mesures, la chambre climatique, le tunnel aérodynamique mobile, les paramètres expérimentaux et les procédures d'essais y sont présentés.

Le chapitre 3 présente les résultats des tests aérodynamiques effectués avec quatre fluides à -10 °C et à -20 °C.

Les résultats obtenus dans le chapitre 3 sont interprétés au chapitre 4 où on considère la dynamique du fluide contaminé par les précipitations durant l'accélération, soit les effets thermodynamiques en jeu lors de la diffusion de l'eau dans le fluide et de la dissolution des particules de glace.

Le chapitre 5 présente les principales conclusions qui l'on peut tirer du travail.

CHAPITRE 2

2. Expérimentation

Ce chapitre décrit la méthodologie ainsi que les équipements expérimentaux dont on a eu besoin pour mesurer la performance aérodynamique des produits antigivre tel que reçus et contaminés par la bruine et la neige. Après les développements théoriques, on décrira la chambre climatique, la mini-soufflerie, et les procédures d'essais utilisées.

2.1 Théorie et définitions

2.1.1 Notion de couche limite (CL)

Dans la théorie des fluides parfaits incompressibles (Cousteix, 1988 et 1989), la répartition des vitesses et des pressions, ainsi que la forme des lignes de courant, sont déterminées principalement par la géométrie des parois limitant l'écoulement, cette dernière étant indépendante de la nature du fluide envisagé. Dans cette section, le mot fluide réfère à une substance gazeuse ou liquide qu'il ne faut pas confondre avec le liquide de dégivrage.

Dans le cas des fluides réels, donc visqueux, les solutions proposées par la théorie des fluides incompressibles sont conformes aux données expérimentales seulement si on considère les zones éloignées des parois. Ce fait est singulier, car les conditions aux limites sont différentes qu'il s'agisse du cas d'un fluide parfait ou d'un fluide visqueux : en effet, avec un fluide parfait, on admet le glissement des particules sur les parois solides, tandis qu'avec un fluide visqueux, on admet qu'il y a adhérence. Donc, il existe, tout près des parois solides, une région transitoire, appelée la couche limite (CL), notée δ , où la vitesse du fluide passe de 0 à la vitesse extérieure (U_∞) (voir Figure 2.1).

2.1.2 Épaisseur du déplacement de la couche limite (EDCL)

L'épaisseur du déplacement de la couche limite (EDCL), notée δ^* , est l'épaisseur qu'il faut ajouter au-dessus de la surface des parois solides pour avoir le même débit fluide, à vitesse uniforme U_∞ , à travers une section droite donnée. δ^* représente ainsi l'épaisseur fictive qu'il faudrait ajouter aux parois pour que le même débit de fluide passe à travers une section droite dans le cas d'un profil uniforme de vitesses (U_∞). La représentation mathématique de l'épaisseur de déplacement est présentée par l'équation 2.1 suivante :

$$\delta^* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{\bar{U}}{U_\infty}\right) dy \quad (2.1)$$

où \bar{U} est la vitesse moyenne à une hauteur y .

Remarquons que plus la couche limite est grande, plus l'épaisseur de déplacement augmente. Ainsi, l'épaisseur de déplacement varie proportionnellement à celle de la couche limite. Il est cependant plus facile de mesurer l'épaisseur de déplacement EDCL que celle de la couche limite CL.

Pour une couche limite sur une plaque sèche, la vitesse à la paroi est obligatoirement nulle; cependant, plus on s'éloigne de la paroi, plus la vitesse augmente et ce, de façon asymptotique, jusqu'à l'obtention de la vitesse de l'écoulement extérieur. Si dans la couche limite les effets de viscosité sont très importants, au delà de celle-ci, ils deviennent pratiquement négligeables.

La Figure 2.1 donne une représentation schématique des couches limites CL (δ) et EDCL (δ^*) telles que définies précédemment.

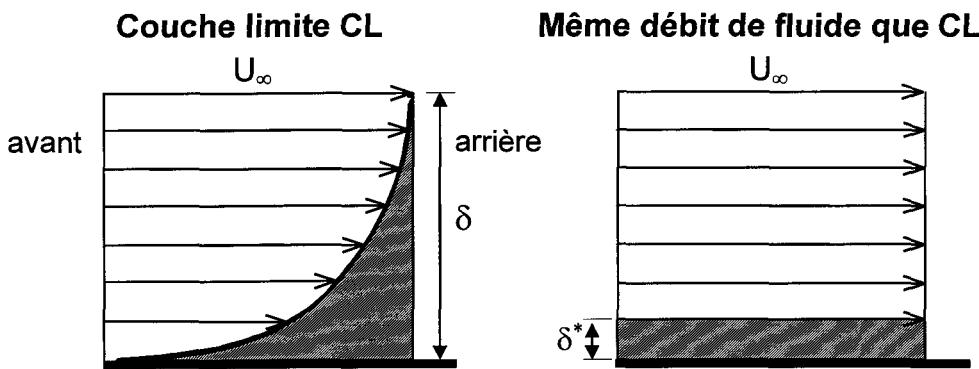


Figure 2.1 Définition de l'EDCL (δ^*)

2.1.3 Type de couches limites

Il y a deux types de couches limites, dépendant du régime d'écoulement : la couche limite laminaire, caractérisée par un profil de vitesses paraboliques, et la couche limite turbulente. Dans cette dernière, la vitesse est dans l'ensemble plus voisine de la valeur extérieure que dans la couche laminaire. Près de la paroi, les gradients de vitesses deviennent plus importants, et par conséquent, les forces de viscosité augmentent ainsi que le frottement sur la paroi.

L'épaisseur de la couche limite n'est pas la même tout le long d'une paroi. Le fluide étant progressivement freiné, l'épaisseur de la couche limite croît d'avant en arrière et sa valeur sera plus grande en régime turbulent qu'en régime laminaire. Les répartitions des vitesses et des pressions se trouveront modifiées à travers la couche limite.

2.2 Description de la chambre climatique

2.2.1 Configuration

Ce travail a été réalisé dans une des chambres climatiques du LIMA, qui est appelée chambre 4M en raison de sa hauteur égale à 4 mètres. Cette dernière est représentée à la Figure 2.2. La chambre 4M est équipée de deux fenêtres à triple vitrage de 60 x 55 cm placées l'une au-dessus de l'autre. La fenêtre du dessous

permet à un observateur extérieur de suivre l'évolution du test, tandis que celle du dessus permet de le filmer à l'aide d'une caméra vidéo.

Un échangeur E est installé dans la partie supérieure de la chambre (voir Figure 2.2). Il est relié à un compresseur placé à l'extérieur. Deux ventilateurs V sont installés à la sortie de l'échangeur et poussent l'air dans la section d'essai de la chambre. Afin de favoriser une répartition uniforme de l'air dans la section d'essai, on le fait passer à travers un déflecteur D et deux panneaux perforés P1 et P2 installés au-dessus de la section d'essai. La Figure 2.2 montre le tunnel mobile ou BLDT mètre placé dans la section d'essai.

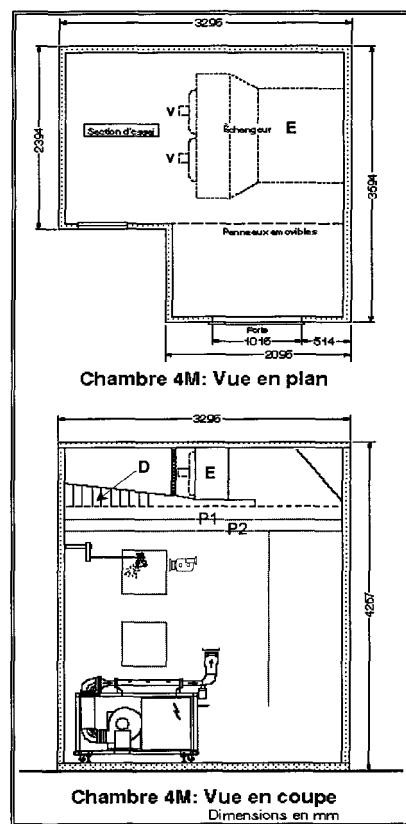


Figure 2.2 Chambre climatique 4M

2.2.2 Conditions climatiques simulées

La chambre peut être maintenue à une température comprise entre 20 °C et -32 °C, cette dernière étant contrôlée avec une précision de $\pm 0,5$ °C. Les températures sont mesurées à l'aide de thermocouples. Un logiciel de contrôle maintient la température de la chambre à la valeur cible imposée par l'utilisateur. Un capteur permet de mesurer le pourcentage d'humidité relative.

Deux types de précipitations ont été simulées : la bruine verglaçante et la neige. Cette dernière condition a été obtenue en saupoudrant la surface du fluide avec des flocons de neige ramassés dehors après une tempête.

2.2.2.1 Génération de la bruine verglaçante

Des gouttelettes sont pulvérisées à l'aide d'un gicleur hydraulique placé à 1,5 m au-dessus de la section d'essai. Le diamètre volumique médian (DVM) des gouttelettes obtenues est $150 \pm 20 \mu\text{m}$. Pour obtenir une distribution uniforme, on fait osciller le gicleur à l'aide d'un moteur à vitesse variable contrôlant sa période d'oscillation. Le gicleur est alimenté à 70 psi (483 kPa) de pression avec de l'eau déminéralisée de qualité ASTM Grade IV. Le débit d'eau est ajusté par un dispositif électromécanique pulsatif ouvrant et fermant une valve. L'intensité de la précipitation est donc ajustée en faisant varier les périodes d'ouverture et de fermeture de la valve. Le système est schématisé à la Figure 2.3.

Les paramètres de simulation de la bruine verglaçante sont données au Tableau 2.1.

Tableau 2.1 Paramètres expérimentaux de la bruine verglaçante

Paramètres	Valeurs
Intensité de givrage	$20-40 \pm 1 \text{ g/dm}^2/\text{h}$
Diamètre volumique médian	$150 \pm 20 \mu\text{m}$
Distance gicleur à BLDT-mètre	150 cm
Type de gicleur	Hydraulique (SS8001)
Pression d'eau	70-80 psi
Temps d'oscillation	24 s
Temps ON/OFF	0,5/1,9 s

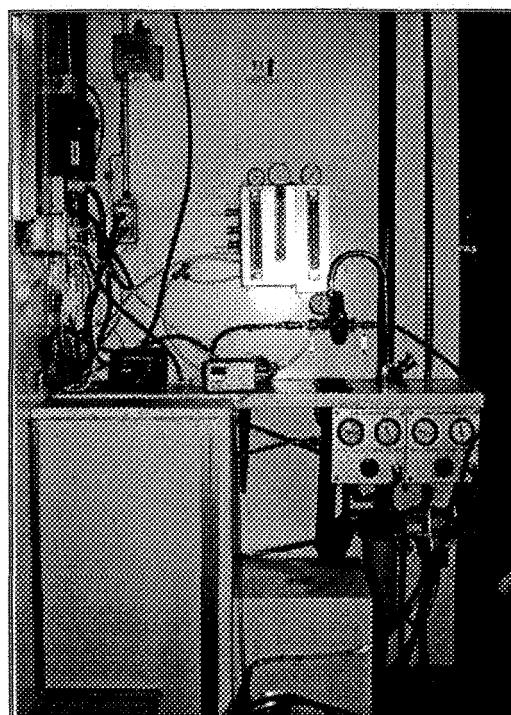
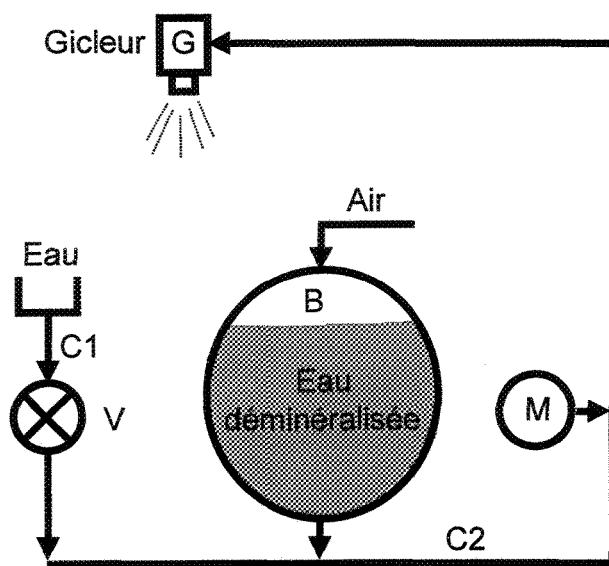


Photo 2.1 Panneau de contrôle du système de génération de la bruine verglaçante



G : Gicleur hydraulique (TEEJET SS8001).

M : Jauge de pression mesurant la pression d'eau à l'entrée du gicleur.

V : Valve.

C1 : Circuit d'entrée d'eau dans la bonbonne.

C2 : Circuit d'entrée d'eau dans la chambre.

B : Bonbonne pressurisée.

Figure 2.3 Schéma du système hydraulique de production de la bruine verglaçante

2.2.2.2 Application de la neige

Dans le cas de la neige, les cristaux de neige sont saupoudrés à l'aide d'un tamis de façon uniforme sur le film du fluide. La neige naturelle est recueillie immédiatement après une tempête pour être conservée dans un congélateur; la densité de neige est calculée d'après le volume et la masse de neige recueillie. Pour observer que les valeurs de δ^* , dans les même conditions (température, dilution etc.), varient avec la densité de neige, on a fait une série d'essais avec de

la neige de différentes densités. Les essais ont été réalisés à -10 °C avec le fluide de type II à l'état tel que reçu et les résultats sont montrés au Tableau B.4 à l'annexe B. On observe que les valeurs de δ^* mesurées restent comparables à l'erreur expérimentale près. Pour l'échantillon II-C dilué à 20 %, on a mesuré un EDCL de 8,52 mm pour la densité de 0,3 g/cm³ et de 8,41 mm pour la densité de 0,056 g/cm³. De même, avec l'échantillon II-C dilué à 40 %, on trouve que la densité de la neige n'affecte pas les valeurs d'EDCL. Ainsi, on obtient 9,01 mm pour la densité de 0,3 g/cm³ et 9,18 mm pour la densité de 0,075 g/cm³. On note donc que la densité de la neige n'a pas d'effet significatif sur les valeurs de δ^* mesurées. Pour le présent travail de recherche, on a choisi pour les essais la neige ayant une densité de 0,3 g/cm³.

2.3 Description du BLDT-mètre

2.3.1 Installation générale

La performance aérodynamique a été évaluée dans un mini-tunnel mobile appelé BLDT-mètre à partir de la mesure de l'EDCL effectuée à 30 s lors de l'élimination d'un film de fluide soumis à un décollage simulé. L'épaisseur du déplacement de la couche limite est calculée à partir des mesures de pression statique effectuées à l'entrée et la sortie de la veine d'essai du mini-tunnel. Le

BLDT-mètre (voir Photo 2.2) est une soufflerie mobile à l'échelle réduite du tunnel aérodynamique utilisé pour les essais aérodynamiques de qualification, qui est beaucoup plus volumineux.

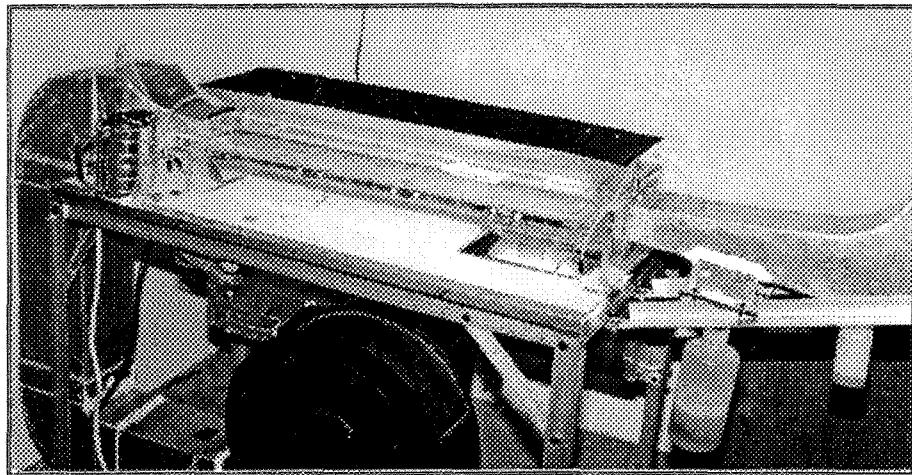


Photo 2.2 BLDT-mètre

La Figure 2.4 montre un dessin du BLDT-mètre. Il comprend les quatre grandes composantes suivantes :

1. Un chariot mobile dont le niveau est ajustable.
2. Une soufflante qui permet d'obtenir les vitesses de vent atteignant jusqu'à 70 m/s simulant le décollage d'un avion.
3. Une conduite d'essai à laquelle on peut accéder au moyen d'un couvercle ouvrant sur l'extérieur. Ce couvercle permet l'application des produits sur le fond de la veine d'essai de

même que leur exposition aux précipitations givrantes simulées.

4. Un panneau de contrôle isolé et chauffé contrôle le ventilateur à fréquence variable. Ce panneau contient les alimentations électriques des différents capteurs : trois capteurs de pression pour mesurer les pressions différentielles entre les points P_2 et P_1 , et les points P_2 et P_3 ; trois sondes de températures T_1 , T_2 et T_3 ; et un capteur d'humidité (voir dessins de la Figure 2.5).

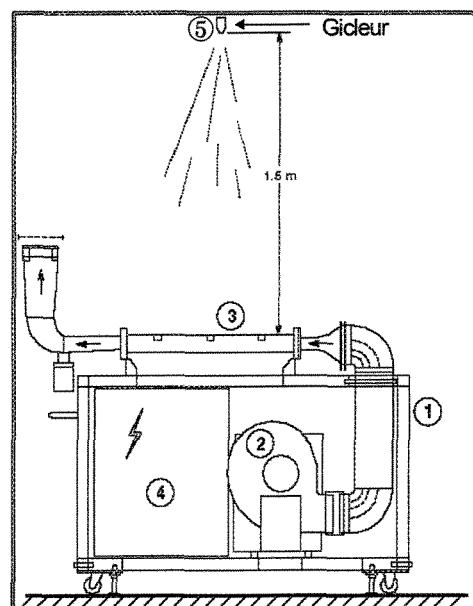
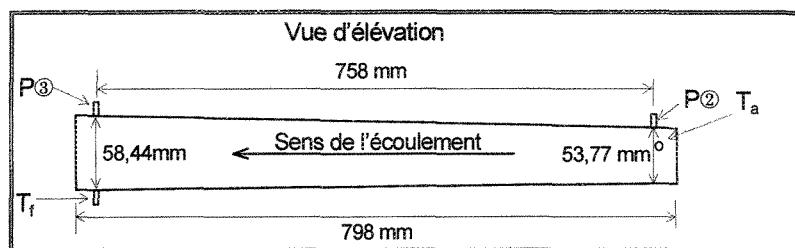


Figure 2.4 Schéma du BLDT-mètre utilisé

- 1 : Chariot mobile
- 2 : Ventilateur
- 3 : Conduite d'essai
- 4 : Panneau de contrôle
- 5 : Gicleur hydraulique

2.3.2 Veine d'essai

La conduite d'essai est montrée sur le dessin de la Figure 2.5. Elle consiste en un tube rectangulaire long de 798 mm et large de 102,7 mm résultant de l'assemblage de quatre plaques planes à angles droits, tel que dessiné à la Figure 2.5.



P₂ : Capteur de pression P₂.

P₃ : Capteur de pression P₃.

T_a : Thermocouple de type T servant à mesurer la température de l'air.

T_f : Thermocouple de type T servant à mesurer la température du fluide.

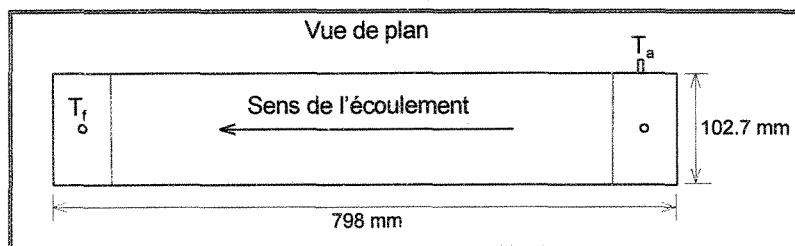


Figure 2.5 Dimensions de la conduite d'essai

La conduite d'essai présente à l'entrée une section rectangulaire de 102,7 mm de large par 53,77 mm de hauteur et, à la sortie, une section de 102,7 mm de large par 58,44 mm de hauteur. La plus grande hauteur à la sortie se trouve à compenser en partie le développement de la couche limite; elle permet ainsi de maintenir une vitesse constante dans la veine d'essai. Les dimensions du conduit aux positions des deux capteurs de pressions P_2 et P_1 sont données au Tableau 2.2.

Tableau 2.2 Dimensions de la conduite d'essai

Position	Distance (mm)	Largeur (L) (mm)	Hauteur (H) (mm)
2	0	102,7	53,77
3	798	102,7	58,44

Durant un essai avec fluide, la plaque plane inférieure est enduite du film de fluide à tester.

2.3.3 Accessoires du BLDT-mètre

Les Photos 2.3 et 2.4 montrent les différents accessoires servant aux diverses manipulations qui sont effectuées : application d'une épaisseur uniforme du fluide, la mesure de l'épaisseur, et le nettoyage après l'essai d'élimination.

Ces accessoires comprennent :

1. Des niveleurs servant à étendre le film liquide à des épaisseurs uniformes allant de 0,25 à 1,6 mm.
2. Une seringue servant à appliquer le fluide lorsque le volume de fluide est trop faible pour pouvoir être appliqué avec le nivelleur.
3. Une jauge d'épaisseur servant à déterminer l'épaisseur du film recouvrant le fond de la boîte au début et à la fin de l'essai d'élimination.

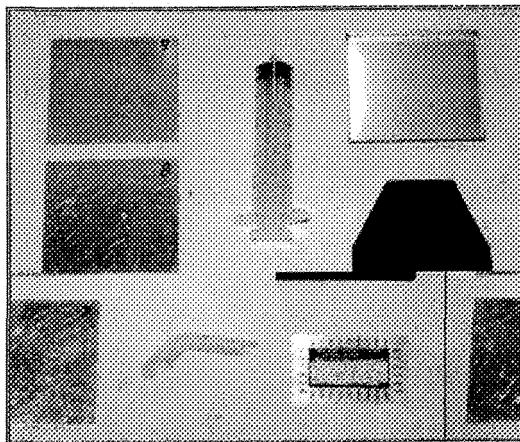


Photo 2.3 Matériel et accessoires

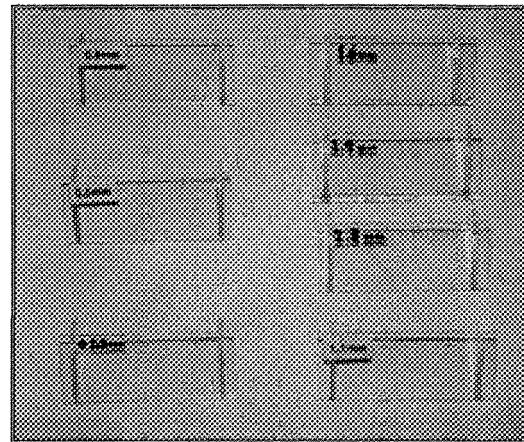


Photo 2.4 Niveleurs

4. Un échantillonneur servant à ramasser quelques millilitres de produit pour la mesure de l'indice de réfraction.
5. Des tubes d'échantillonnage servant à conserver les échantillons collectés par l'échantillonneur pour mesures ultérieures.

6. Un grattoir servant à enlever le résidu du liquide à l'intérieur de la veine d'essai.

2.4 Paramètres expérimentaux

2.4.1 Mesure des pressions

Les capteurs de pression aux positions P_① et P_② sont du type piézo-électrique ayant une précision de ±1 %.

2.4.2 Mesure des vitesses

La vitesse du vent qui passe dans le tunnel est calculée à partir de la différence de pression entre la pression statique de référence P₁, mesurée devant le convergent, et la pression P₂ mesurée à l'entrée du conduit. La vitesse V₂ est ainsi déterminée par calcul à partir de la relation suivante :

$$V_2 = \frac{A_2}{A_1} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho_a}} \quad (2.2)$$

où A₁ et A₂ représentent l'aire de la section normale à la position de mesure des pressions P₁ et P₂ respectivement ou P_① et P_② respectivement. Le terme ρ_a représente la densité de l'air à la température de l'essai.

2.4.3 Mesures de la température et l'humidité relative

Les températures de l'air et du fluide, désignées T_a et T_f , sont mesurées à l'aide de thermocouples de type T. Le thermocouple T_a est localisé dans la paroi supérieure du conduit à la section 2, tandis que T_f est logé dans la paroi inférieure, à la section 3. La précision des thermocouples est de $\pm 0,5$ °C, dans l'intervalle de température compris entre -60 °C et 100 °C. L'étalonnage des thermocouples T_a et T_f est effectué à intervalles réguliers en utilisant, comme référence, un mélange de glace et d'eau à 0 °C.

L'humidité relative de l'air est enregistrée par un capteur placé dans la chambre climatique. On mesure seulement ce paramètre sans le contrôler.

2.4.4 Mesure de l'EDCL ou δ^*

L'épaisseur du déplacement de la couche limite, δ^* , est mesurée par le blocage occasionné par le film fluide lors de son élimination. Ce blocage produit une différence de pression $P_2 - P_3$ entre l'entrée P② et la position P③ choisie pour la mesure. Afin de déterminer la pression statique de référence, on se sert d'une prise de pression placée devant le convergent, qui est dénotée P①.

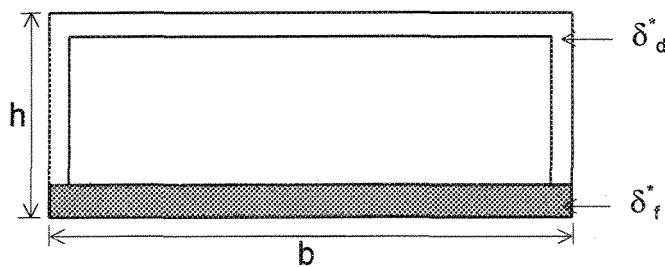


Figure 2.6 EDCL sur les parois de la section d'essai

L'EDCL est illustrée à la section montrée à la Figure 2.6. Les pressions statiques sont notées P_2 et P_3 , les vitesses, V_2 et V_3 , et les sections, A_2 et A_3 . Les largeurs, hauteurs et périmètres sont, pour leur part, notés b_2 , h_2 , c_2 et b_3 , h_3 , c_3 .

Lorsqu'un fluide recouvre la surface inférieure du conduit, l'épaisseur de déplacement de la couche limite désignée par δ_f^* se développe sur le plancher, tandis que l'épaisseur de déplacement sans fluide δ_{sec}^* se développe sur les côtés et à la paroi supérieure (Figure 2.6). On peut définir alors un EDCL moyen δ_{moy}^* correspondant à une section donnée :

$$\delta_{moy}^* \times c_3 = \delta_{sec}^* \times (b_3 + 2h_3) + \delta_f^* \times b_3 \quad (2.3)$$

Puisque $b_3 + 2h_3 = c_3 - b_3$, on a

$$\delta^*_f = \frac{c_3}{b_3} \left(\delta^*_{\text{moy}} - \frac{c_3 - b_3}{c_3} \times \delta^*_{\text{sec}} \right) \quad (2.4)$$

Dans le cas d'un essai d'élimination à sec ou sans fluide, on aura

$$\delta^*_{\text{sec}} = \delta^*_{\text{moy}} \quad (\text{sans fluide}) \quad (2.5)$$

Selon cette définition et celle de la valeur de l'EDCL, définissons le flux massique m à travers l'aire de la section A comme suit :

$$\text{Débit massique } \dot{m} = \rho_a V_a \bar{A}$$

où :

$$\bar{A} = A - \delta^*_{\text{moy}} \times c \quad (2.6)$$

Selon l'équation continue (conservation du débit massique) entre la section 2 et la section 3, nous avons :

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (2.7)$$

donc $\rho_a V_2 \bar{A}_2 = \rho_a V_3 \bar{A}_3$, nous avons

$$V_2 \times \bar{A}_2 = V_3 \times \bar{A}_3 \quad (2.8)$$

Comme la couche limite CL augmente avec la longueur, l'EDCL croît de la section 2 à la section 3. Dans la section 2, la valeur de l'EDCL est considérée comme négligeable. En accord avec cette hypothèse, l'équation (2.6) donne

$$\bar{A}_2 = A_2 \quad (2.9)$$

et

$$\bar{A}_3 = A_3 - \delta^*_{\text{moy}} \times c_3 \quad (2.10)$$

2.8, 2.9 et 2.10 donnent

$$\frac{V_2}{V_3} = \frac{\bar{A}_3}{\bar{A}_2} = \frac{A_3 - c_3 \times \delta^*_{\text{moy}}}{A_2} \quad (2.11)$$

D'après l'équation de Bernouilli, nous avons :

$$P_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 = P_3 + \frac{1}{2} \rho V_3^2 \quad (2.12)$$

soit :

$$\frac{1}{2} \rho V_2^2 = P_1 - P_2 \quad (2.13)$$

$$\frac{1}{2} \rho V_3^2 = P_1 - P_3 \quad (2.14)$$

où P_1 est la pression totale (c'est une pression statique mesurée à basse vitesse dans le tunnel) et ρ est la densité du gaz dans le tunnel. Par conséquent, 2.13 et 2.14 donnent

$$\frac{V_2}{V_3} = \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_3}} \quad (2.15)$$

En introduisant l'équation (2.11) et (2.15), nous obtenons la formule de calcul pour l'EDCL moyenne à la section 3 comme étant une fonction des mesures de pression statique $P_1 - P_2$ et $P_2 - P_3$.

$$\sqrt{\frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_3}} = \frac{A_3}{A_2} - \frac{c_3}{A_2} \times \delta_{\text{moy}}^* \quad (2.16)$$

soit :

$$\delta_{\text{moy}}^* = \frac{A_3}{c_3} - \frac{A_2}{c_3} \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{P_1 - P_3}} \quad (2.17)$$

avec $P_1 - P_3 = (P_1 - P_2) + (P_2 - P_3)$, l'équation (2.17) devient :

$$\delta^*_{\text{moy}} = \frac{1}{c_3} \left[A_3 - A_2 \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{(P_1 - P_2) + (P_2 - P_3)}} \right] \quad (2.18)$$

L'équation (2.18) est utilisée pour déterminer δ^*_{sec} dans un essai d'élimination sans fluide appliqué où $\delta^*_{\text{sec}} = \delta^*_{\text{moy}}$. Cette dernière valeur $\delta^*_{\text{sec}} = \delta^*_{\text{moy}}$ va être utilisée pour calculer δ^* , à partir de l'équation (2.4).

Les valeurs de l'EDCL (désignée par δ^*_f) mesurées en bout de plaque de la veine à la fin de la rampe de vitesse à 30 ± 3 s, se sont révélées être proportionnelles aux pertes de portance obtenues en soufflerie sur des ailes bidimensionnelles.

Le BLDT-mètre est étalonné de façon à obtenir une corrélation entre les valeurs de l'EDCL mesurées dans le tunnel de grande dimension; ce dernier sera considéré ici comme donnant la mesure normalisée.

2.4.5 Contrôle du mini-tunnel et traitement des données

Un ordinateur de type PC est utilisé pour le contrôle du ventilateur, pour l'acquisition et le traitement des données (voir Photo 2.5). Il comporte cinq canaux d'entrée : deux pour les pressions différentielles, $\Delta P_1 = P_2 - P_1$ et $\Delta P_2 = P_3 - P_2$;

deux pour les thermocouples T_a et T_f , et un pour la sonde d'humidité. Le taux d'acquisition est de 4 données par seconde par canal. Une technique de lissage est utilisée pour traiter les données de pression par intégration sur 9 points. Ceci est équivalent à une moyenne mobile pendant une seconde.



Photo 2.5 Instruments de l'acquisition et le traitement

La vitesse V_2 (en m/s), dans la section d'essai, est contrôlée via la fréquence f (en Hz) modulée par l'alimentation du ventilateur, en accord avec la relation suivante :

$$V_2 = 1,3 f + 2,4 \quad (2.19)$$

La déviation standard autour de la vitesse maximale de 65 m/s cible est de l'ordre de 1 m/s, soit $\pm 1,5 \%$.

2.5 Procédures expérimentales

2.5.1 Manipulations

De façon générale, la conduite des essais comporte la séquence des opérations et des manipulations suivantes :

1. Application d'une épaisseur uniforme de 1,5 mm du fluide à tester.
2. Mesure de l'épaisseur initiale du fluide.
3. Élimination lors d'un décollage simulé.
4. Mesures de la rampe de vitesse pendant 1 minute et détermination de l'EDCL à 30 ± 3 secondes.
5. Mesure de l'épaisseur finale du fluide.
6. Nettoyage de la veine d'essai avec des chiffons de papier et de l'alcool.

2.5.2 Choix de l'épaisseur initiale du fluide

Dans les essais avec le BLDT-mètre, l'épaisseur initiale du film des fluides est fixée approximativement à 1,5 mm. Pourquoi ne pas choisir d'autres

épaisseurs finales? Afin de répondre à cette question, une série d'essais a été réalisée avec différentes épaisseurs de films de fluide. Les fluides utilisés pour ces essais sont : un produit de type II à l'état tel que reçu (désigné échantillon II-B) et à l'état dilué à 50 % (désigné échantillon II-B 50/50). Les essais ont été réalisés à -10 °C dans la condition de bruine verglaçante.

Ces produits ont été appliqués pour quatre valeurs différentes d'épaisseurs initiales : 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm et 3 mm dans les cas du produit non dilué et prédilué 50/50.

Dans le cas du produit dilué avec la bruine, on fait varier le temps d'exposition à la bruine de façon à obtenir une dilution équivalente à 50/50 compte tenu de l'épaisseur des films de fluide appliqués :

$$0,75 \text{ mm (fluide à l'état reçu)} + 0,75 \text{ mm (de bruine)} = 1,5 \text{ mm}$$

$$1,0 \text{ mm (fluide à l'état reçu)} + 1,0 \text{ mm (de bruine)} = 2,0 \text{ mm}$$

$$1,25 \text{ mm (fluide à l'état reçu)} + 1,25 \text{ mm (de bruine)} = 2,5 \text{ mm}$$

$$1,5 \text{ mm (fluide à l'état reçu)} + 1,5 \text{ mm (de bruine)} = 3,0 \text{ mm}$$

Les valeurs δ^* obtenues à -10 °C dans ces essais sont montrées à la Figure 2.7. Dans le cas du fluide prédilué à 50/50 (courbe du bas), on observe que les valeurs de δ^* mesurées sont du même ordre de grandeur, à l'erreur expérimentale près, pour les quatre valeurs d'épaisseurs utilisées. Dans le cas du

produit à l'état non dilué et du produit contaminé par la bruine (courbe supérieure), on note une légère augmentation de la valeur δ^* à mesure que l'épaisseur initiale du film augmente. Toutefois, cette augmentation n'est pas jugée très significative.

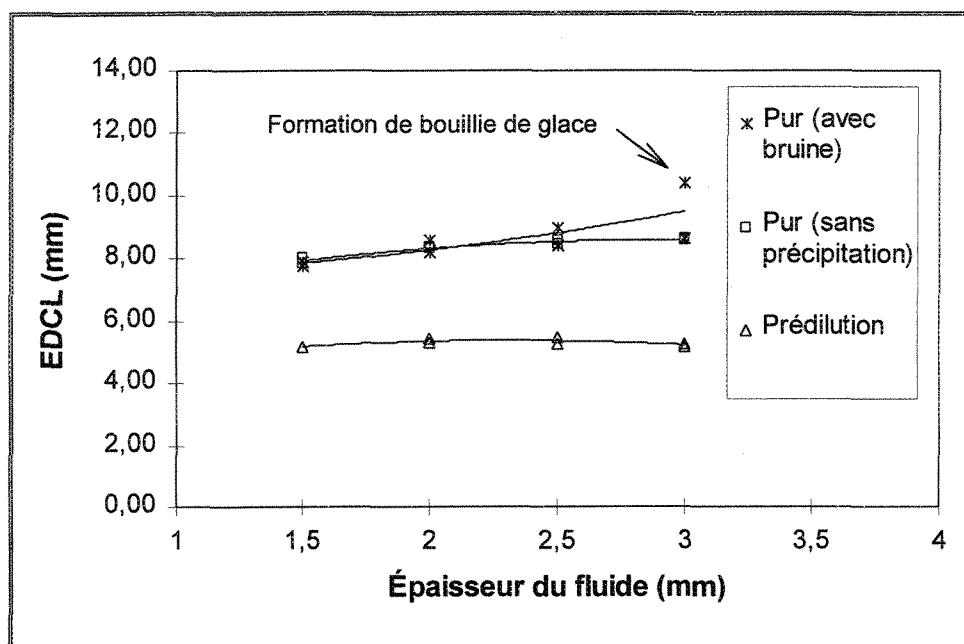


Figure 2.7 Effet de l'épaisseur initiale du fluide sur l'EDCL à 30 s mesurée à -10 °C

2.5.3 Effet de la température d'application

La procédure de refroidissement du fluide varie selon la température ciblée pour l'essai. Pour un essai à -10 °C ou à -20 °C, le fluide doit être refroidi pendant

environ 3 heures, dans la chambre climatique à -10 °C ou -20 °C, pour être amené à la température de l'essai.

Le BLDT-mètre est laissé en fonctionnement à une vitesse de 10 m/s avant l'application du fluide dans le but d'atteindre rapidement la température expérimentale désirée. Cela peut prendre parfois jusqu'à 1 heure pour certains essais dont ceux effectués aux températures les plus basses.

Les fluides dilués sont préparés par addition d'eau déminéralisée de qualité ASTM grade IV. Le pourcentage de dilution D(%) est calculé par l'équation suivante :

$$D(\%) = \frac{100 \times V_e}{V_e + V_f} \quad (2.20)$$

où V_e et V_f représentent respectivement les volumes d'eau ajoutée et le volume de fluide.

Il convient de ne pas confondre le pourcentage de dilution et le contenu en eau du fluide. L'équation (2.20) ne considère pas, en effet, l'eau contenue dans le fluide avant la dilution. La même équation sera utilisée pour calculer le pourcentage de la dilution occasionnée par l'eau provenant des précipitations de la bruine verglaçante et de neige qui pénètre dans le film du fluide pour y diffuser

ou s'y dissoudre. Trois formes de contamination ont été étudiées : la dilution homogène, la dilution dynamique par des gouttelettes surfondues, et la dissolution de particules solides de neige.

Lorsque la température du BLDT-mètre a atteint la température désirée -10 °C ou de -20 °C, on mesure tout d'abord le δ^* lors d'un essai d'élimination à sec, c'est-à-dire sans aucun fluide; on vérifie alors que la valeur obtenue est dans la fourchette de $2,8 \pm 0,3$ mm. Si δ_{sec}^* est à l'intérieur de cette fourchette, on procède à un essai avec le fluide de référence (MIL-A-8243D) où on doit obtenir des valeurs dans un intervalle donné. Un conduit mal nettoyé ou un couvercle fermé de façon non hermétique va affecter les mesures de δ_{sec}^* et du produit de référence, permettant ainsi de juger de la qualité de la mesure.

2.5.4 Cas des fluides prédilués

Dans le cas de la dilution préalable, un volume de 150 ml de fluide, correspondant à une couche uniforme de 1,5 mm, est appliqué au fond du conduit du BLDT-mètre. On utilise le niveleur pour étendre le liquide uniformément, puis on attend de 1 à 5 minutes pour que le fluide et l'air soient sensiblement à la température de l'essai ; pendant l'attente, on fait circuler l'air au-dessus du fluide à 5 m/s. Après ce temps d'attente, le tunnel est mis en marche de façon à accélérer

la vitesse de l'air (5 m/s) à la vitesse maximale de 65 m/s en environ 30 secondes. Cette accélération simule la condition de l'avion lors de la phase d'accélération sur la piste au moment du décollage. La valeur de l'EDCL est mesurée à 30 secondes en faisant la moyenne des valeurs entre 27 et 33 secondes.

2.5.5 Contamination par la bruine verglaçante

Dans les essais avec les gouttelettes surfondues, l'intensité est maintenue constante à 24 g/dm²/h, et c'est la quantité d'eau à laquelle le fluide est soumis qui varie, ce dernier paramètre étant contrôlé par la durée de l'exposition à la précipitation. On a retenu la valeur de 24 g/dm²/h, parce que cette intensité est associée à cinq accidents d'avions qui se sont produits entre 1972 et 1992 (Rasmussen, 1995). L'intensité de la précipitation est déterminée par la mesure de la masse de glace recueillie sur neuf plaquettes témoins de 10 × 10 cm² réparties sur toute l'aire d'essai. La variation de l'intensité de la précipitation, telle que mesurée dans un test d'étalonnage montré au Tableau 2.3, présente une fluctuation correspondant à un écart type de 1,40 g/dm²/h.

Tableau 2.3 Uniformité de l'intensité de givrage (g/dm²/h) sous bruine verglaçante

22,35	22,95	23,55
23,40	23,45	26,30
23,80	25,90	25,50

$$\begin{aligned} \text{Valeur moyenne } I &= 24,13 \text{ g/dm}^2/\text{h} \\ \text{Écart type } \sigma &= 1,40 \text{ g/dm}^2/\text{h} \end{aligned}$$

Le volume du fluide candidat appliqué sur le fond du BLDT-mètre varie selon le pourcentage de la dilution dynamique choisie. La méthode d'application du produit dépend de l'épaisseur du fluide initialement appliquée. De façon générale, on verse la quantité requise de fluide pour obtenir l'épaisseur désirée et on l'étend sur toute la plaque qui présente une surface S_{EDCL} de 7,82 dm² (par exemple, 93,8 ml de fluide donne une épaisseur de 1,20 mm), ensuite le fluide est exposé aux précipitations. La quantité initiale de fluide est déterminée en considérant que l'épaisseur du fluide contaminé après la précipitation sera de 1,5 mm. L'épaisseur initiale du fluide appliquée E_f et la durée de la précipitation correspondant à la dilution cible sont calculées à l'aide des équations suivantes : (considérant l'épaisseur d'eau E_e nécessaire pour obtenir la dilution cible)

$$E_f + E_e = 1,5 \text{ mm} \quad (2.21)$$

$$E_e = \frac{E_f D}{100 - D} \quad (2.22)$$

2.21 et 2.22 donnent

$$E_f + \frac{E_f D}{100 - D} = 1,5 \text{ mm} \quad (2.23)$$

$$E_f = \frac{1,5(100 - D)}{100} \text{ (mm)} \quad (2.24)$$

Les temps d'exposition t à la bruine verglaçante sont calculés à partir de la quantité d'eau permettant d'obtenir l'épaisseur cible E_e à une intensité de précipitation de 24 g/dm²h. Ce qui donne :

$$M_e = E_e \times \rho_{eau} S_{EDCL} \quad (2.25)$$

et

$$M_e = I \times t \times S_{EDCL} \quad (2.26)$$

soit :

$$t \text{ (min)} = \frac{M_e}{S_{EDCL} I} = \frac{E_e \times S_{EDCL} \times 1 \text{ g} \times (\text{dm}^2) \times \text{hr} \times 60\text{min}}{S_{EDCL} \text{ cm}^3 \times 24 \text{ g hr}}$$

$$t \text{ (min)} = \frac{E_e (\text{mm}) \times (\text{dm}^2) \times 60 \text{ (min)}}{24 \text{ cm}^3} = \frac{E_e \times 0,1 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}^2 \times 60 \text{ (min)}}{24 \text{ cm}^3}$$

$$= 25 E_e \text{ (min)}$$

Pour une intensité de $24 \text{ g/dm}^2/\text{h}$, les temps d'exposition sont ceux donnés au Tableau 2.4.

Tableau 2.4 Relation entre le temps d'exposition et le pourcentage de dilution à un taux de précipitation de $24 \text{ g/dm}^2/\text{h}$

D (%)	10	20	30	40	50	60	70	75	80
V _f (ml)	105,0	93,8	82,1	70,4	58,7	46,9	35,2	29,3	23,5
E _f (mm)	1,35	1,20	1,05	0,90	0,75	0,60	0,45	0,38	0,30
T (min)	3,8	7,5	11,3	15,0	18,8	22,5	26,3	28,0	30,0

Dans ce tableau, les valeurs ont été calculées en utilisant les relations suivantes

D (%) : Pourcentage de la dilution

V_f (ml) : Volume de fluide = $10 \times S_{EDCL} (\text{dm}^2) \times E_f (\text{mm})$

$$V_e \text{ (ml)} = S_{EDCL} \text{ (dm}^2\text{)} E_e \text{ (mm)}$$

S_{EDCL} : Surface de la conduite d'essai = 7,6 (dm) \times 1,029 (dm) = 7,82 (dm 2)

$$E_f \text{ (mm)} = 1,5 \times (100-D)/100$$

$$t \text{ (min)} = 60 \times M_e \text{ (g)} / S_{EDCL} \text{ (dm}^2\text{)} / I \text{ (g/dm}^2/\text{h)}$$

$$M_e \text{ : Masse de l'eau de précipitation} = E_e S_{EDCL} \times \rho_e$$

$$I \text{ : Intensité de la précipitation} = 24 \text{ g/dm}^2/\text{h}$$

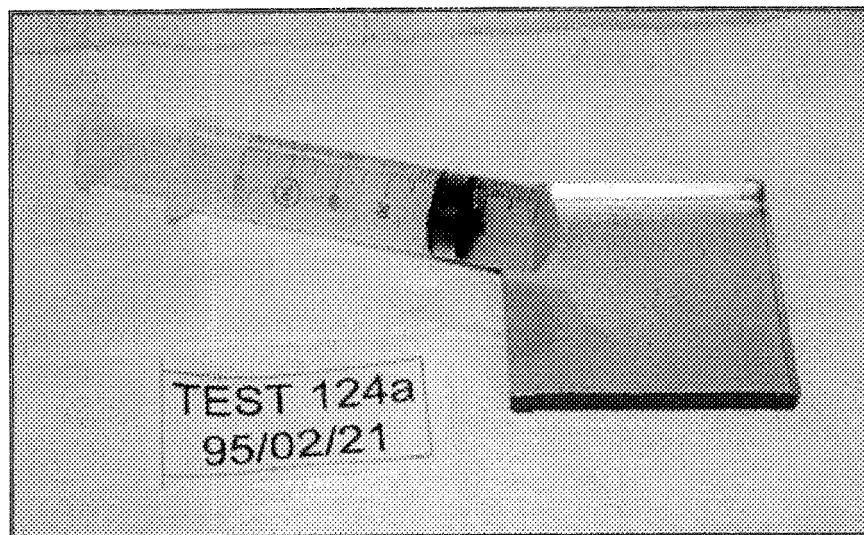


Photo 2.6 Seringue servant à appliquer les faibles quantités de fluide

Pour avoir une précision suffisante, particulièrement lorsque le taux de la dilution est élevé, un faible volume de fluide doit être appliqué, on utilise alors une seringue comme celle montrée à la Photo 2.6.

2.5.6 Cas de la neige

La contamination par les cristaux de neige consiste à saupoudrer le film fluide avec des cristaux de neige. Dans ces essais, la masse de neige appliquée correspond aux quantités d'eau calculées à l'aide des mêmes relations (équations 2.20 à 2.26) que celle utilisée pour la bruine verglaçante, en remplaçant la quantité d'eau par la masse de neige devant être appliquée pour obtenir la dilution cible. Lors des essais, la neige est saupoudrée sur toute la couche du fluide. Après l'application, on attend un temps prédéfini; les valeurs de ce dernier sont les mêmes que celles données au Tableau 2.4. Le but de ce temps d'attente est d'avoir le même temps que celui correspondant à une chute de neige d'intensité de 24 g/dm²/h. Des essais ont montré que les valeurs de l'EDCL ne varient pas sensiblement selon que la neige était éparpillée continuellement pendant tout le temps d'attente ou qu'elle était saupoudrée en une seule fois. A la fin du temps d'attente, le couvercle du BLDT-mètre est fermé.

2.5.7 Test d'élimination

Immédiatement après l'application du fluide à l'état dilué, après l'exposition à l'intensité de 24 g/dm²/h de la bruine verglaçante, ou après le temps d'attente suivant le saupoudrage, l'essai d'élimination entièrement contrôlé par l'ordinateur

est enclenché. L'essai consiste en une simulation de décollage d'un gros transporteur, une accélération de la vitesse initiale d'environ $2,6 \text{ m/s}^2$ est imposée dès le début, jusqu'à l'obtention de la vitesse maximale de $65 \text{ m/s} \pm 5 \text{ m/s}$ qui est atteinte en 27 secondes.

Sous l'action du vent, le fluide s'élimine rapidement en vagues successives, ce qui réduit son épaisseur. La valeur de l'EDCL commence à croître jusqu'à atteindre une valeur maximale, entre 10 et 15 secondes du début de l'accélération, lorsque l'amplitude des vagues est maximale. Le ventilateur est automatiquement stoppé 70 secondes après le début de l'essai, et les résultats sont imprimés. La valeur affichée de l'EDCL est la valeur moyenne mesurée entre la 27^{ième} et la 33^{ième} seconde après la début du test. La vitesse et l'EDCL mesurées en fonction du temps sont illustrées à la Figure 2.8, qui montre l'enregistrement de l'essai d'élimination du fluide de référence à -10°C .

La courbe du haut est celle de la vitesse où l'on peut voir l'accélération à $2,3 \text{ m/s}^2$ jusqu'à la vitesse maximum de 65 m/s . Après 30 secondes, la vitesse est maintenue constante à 65 m/s pendant 40 secondes. La courbe inférieure est celle de l'EDCL qui atteint sa valeur maximale à 14 secondes du début de l'accélération. Les valeurs moyennes des températures du fluide et de l'air, et de l'humidité relative sont imprimées dans l'encart au milieu du graphique avec le libellé de l'essai.

Le libellé de l'essai identifie le fluide et est également indicatif des conditions de l'essai. Ainsi, par exemple, MILC011 signifie que le fluide est le fluide (militaire) de référence; C identifie la température de -10 °C et 011 est le numéro de l'essai effectué dans l'ordre chronologique.

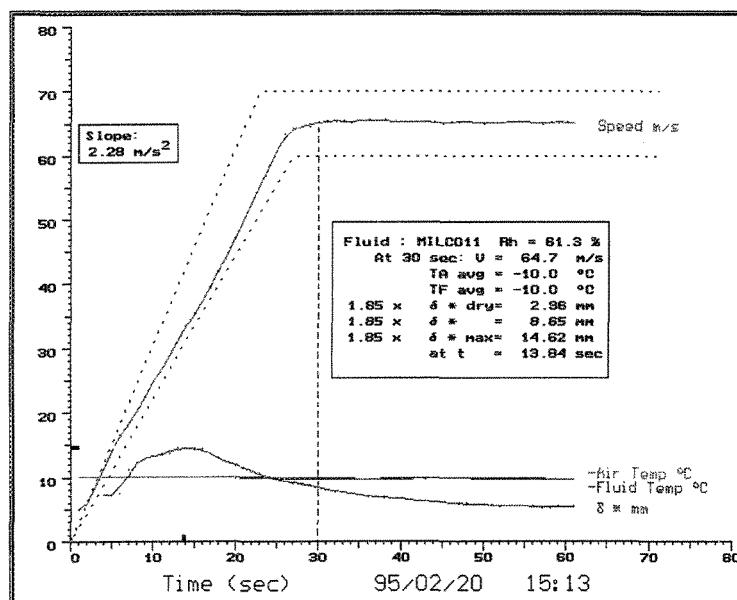


Figure 2.8 EDCL fonction du temps avec le fluide référence à -10 °C

CHAPITRE 3

3. Résultats expérimentaux

Ce chapitre présente les résultats des tests aérodynamiques effectués à -10 °C et -20 °C, avec les fluides prédilués et avec ceux contaminés par la bruine verglaçante et la neige.

3.1 Identifications des produits

Quatre fluides commerciaux ont été soumis aux présentes évaluations aérodynamiques : soit deux fluides dégivrants de type I et deux fluides antigivre, l'un de type II et l'autre de type IV. Les quatre fluides sont identifiés aux Tableaux 3.1 avec leurs libellés. Les caractéristiques suivantes ont été mesurées : l'indice de réfraction; le pH à la température ambiante et la viscosité à +20 °C et -20 °C. Les mesures du pH et de l'indice de réfraction ont été effectuées selon les normes ASTM E-70 et ASTM D-1747. Les valeurs mesurées sont comprises dans l'intervalle de celles spécifiées pour ces produits. Étant donné que ces produits sont des fluides commerciaux, leurs

caractéristiques ne sont pas présentées de façon à ne pas identifier le nom du manufacturier et ainsi en assurer la confidentialité.

Tableau 3.1 Identification des fluides soumis aux essais

Type	Condition	Code du LIMA	Libellé
Type I P.G.	Dilution 55/45	A653	I-A
Type I E.G.	Dilution 50/50	B009	I-B
Type II P.G.	Tel que reçu	A838	II-C
Type II P.G.	Dilution 50/50	A838	II-C 50/50
Type IV E.G.	Tel que reçu	A922	IV-D
Type I P.G.	Tel que reçu	MIL015	MIL

3.2 Étalonnage et acceptabilité

L'étalonnage consiste en une série d'essais aérodynamiques effectués avec le BLDT-mètre sans fluide et avec le fluide de référence MIL015. Les essais sont réalisés à la température de 0 °C, -5 °C, -10 °C, -20 °C et -25 °C. Les valeurs de l'EDCL obtenues en condition sèche doivent être comprises entre 2,5 et 3,1 mm. Les valeurs de l'EDCL obtenues avec le fluide de référence sont identifiées par la lettre D suivie de la température. Le domaine d'acceptabilité aérodynamique du BLDT-mètre est calculé à partir des mesures de l'EDCL obtenues en condition sèche δ^*_{sec} et avec le fluide de référence δ^*_{mil} . Un fluide sera considéré acceptable si les valeurs de l'EDCL mesurées ne dépassent pas la limite supérieure de l'acceptabilité. Les calculs sont faits selon la même procédure que celle utilisée lors de la certification de produits commerciaux dans le tunnel à vent de l'UQAC (Laforte, J. L., Bouchard, G., Louchez, P. R., 1992).

Dans la procédure normalisée, la limite supérieure d'acceptabilité définit une droite qui est horizontale aux températures inférieures à -20 °C (D20). Entre -20 °C et 0 °C, la ligne passe par les points D20 (-20 °C) et D0 (0 °C). La limite supérieure d'acceptabilité est présentée à la Figure 3.1. Les valeurs des points D20 et D0 sont calculées à l'aide des équations 3.1 et 3.2 (SAE AMS 1424B, 1996) :

$$D20 = \delta_{ref}^* - 0,18 (\delta_{ref}^* - \delta_{sec}^*)_{-20} \quad (3.1)$$

$$D0 = \delta_{ref}^* + 0,71 (\delta_{ref}^* - \delta_{sec}^*)_0 \quad (3.2)$$

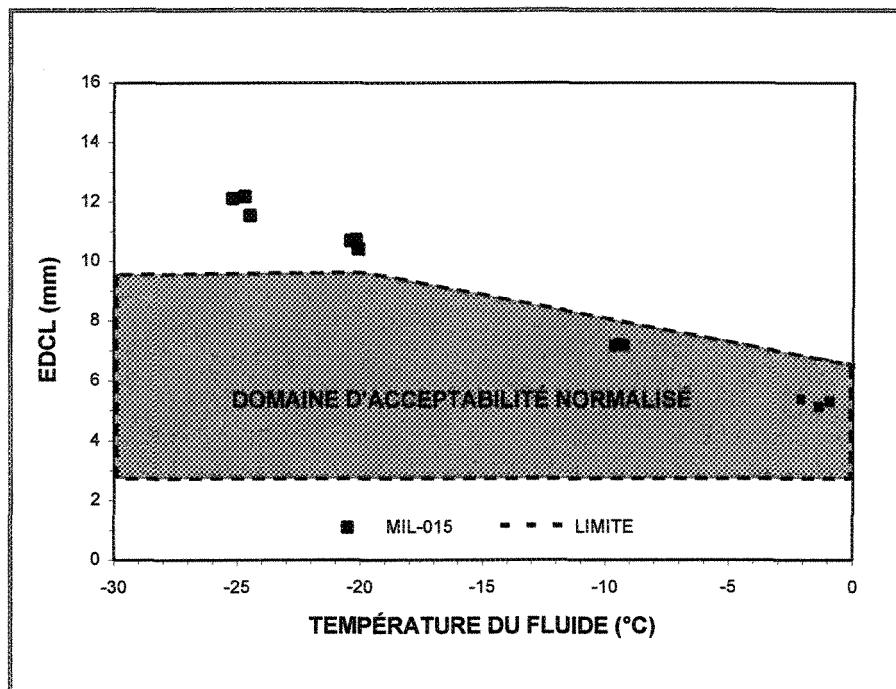


Figure 3.1 Limites d'acceptabilité en fonction de la température

La limite d'acceptabilité considérée dans ce travail n'est présentée que pour comparer les performances des produits entre eux. Elle ne peut cependant pas être utilisé comme critère abosolu d'acceptabilité d'un produit selon les normes AMS 1424A et AMS 1428B.

3.3 Dilution et contamination à -10 °C

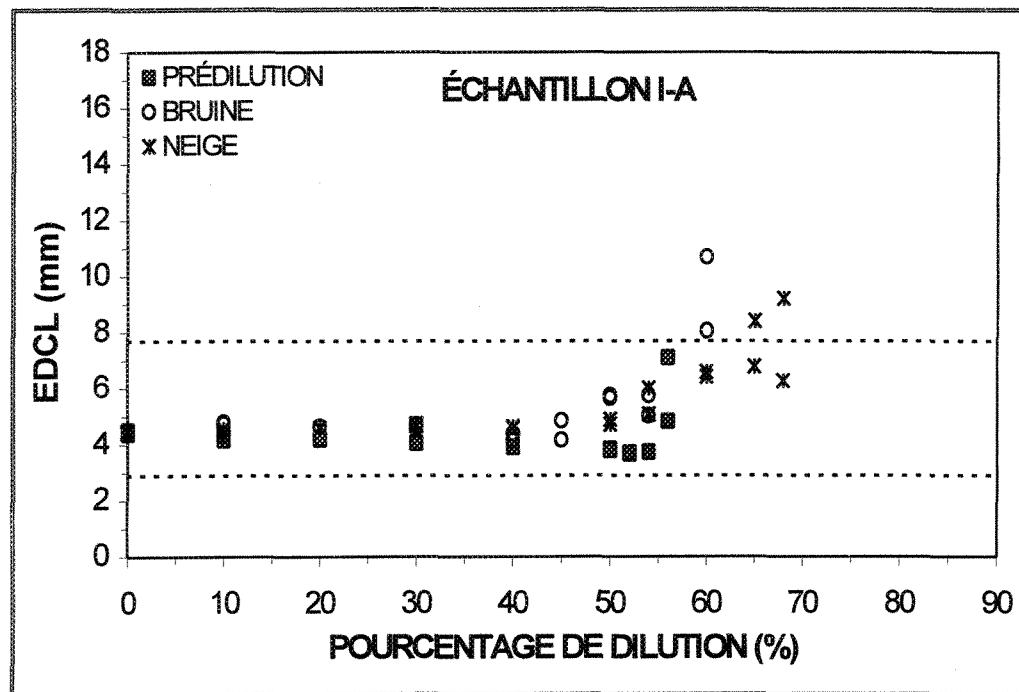
Les effets de la prédilution et de la contamination par la bruine verglaçante et la neige naturelle sur les valeurs de EDCL ont été étudiés avec

les quatre produits commerciaux. Le niveau de contamination, tout comme la dilution, est exprimé à l'aide du pourcentage d'eau ajoutée au produit. La performance aérodynamique est déterminée à partir de l'EDCL mesurée à 30 secondes lors de l'essai d'élimination.

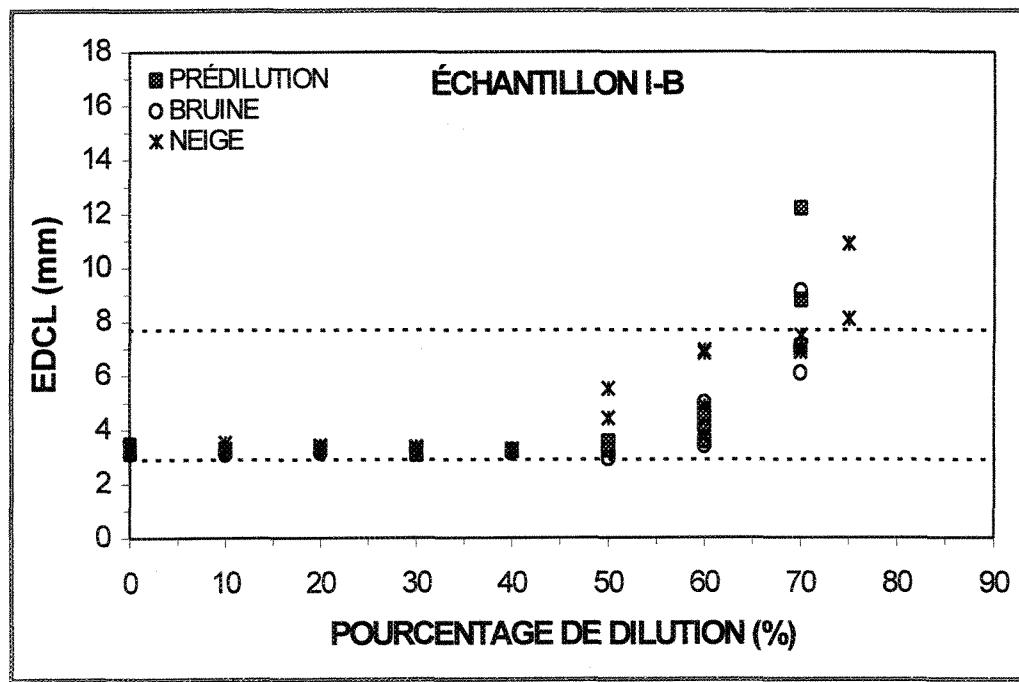
Les valeurs de l'EDCL mesurées à -10 °C, avec les quatre produits, sont présentées, en fonction du pourcentage de dilution, aux Figures 3.2 et 3.3. Dans chaque figure, le carré plein identifie la condition de la prédilution, le carré vide et l'étoile représentent respectivement les contaminations par la bruine verglaçante et par la neige naturelle. Dans chaque cas, le domaine d'acceptabilité est défini par deux droites, la droite supérieure correspondant à l'acceptabilité calculée à -10 °C telle que définie à la section 3.2, et la droite inférieure correspondant à l'EDCL sans fluide. Les données, au-dessus de la limite supérieure, indiquent une perte de portance supérieure à la valeur limite prescrite dans la procédure aérodynamique normalisée.

3.3.1 Produits de type I à -10 °C

Pour les deux produits de type I (voir les Figures 3.2a et 3.2b), jusqu'à la dilution de 40 %, l'EDCL ne varie pas beaucoup avec l'augmentation de la dilution indépendamment du type de contamination ; tous les points se



a) Échantillon I-A



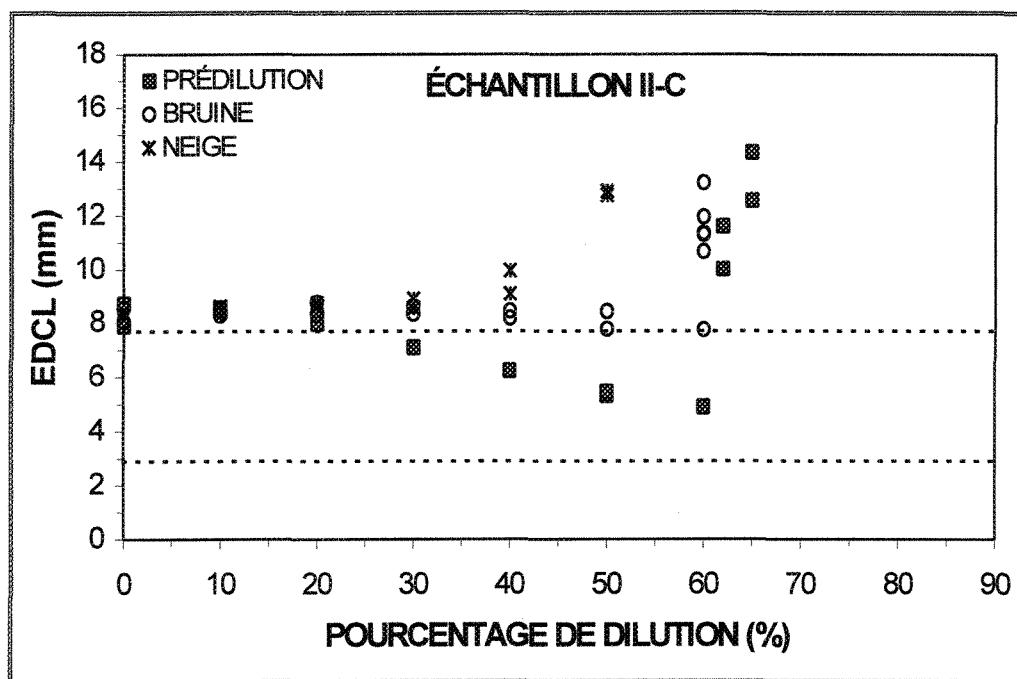
b) Échantillon I-B

Figure 3.2 EDCL à 30 s mesuré à -10 °C en fonction de la dilution du fluide

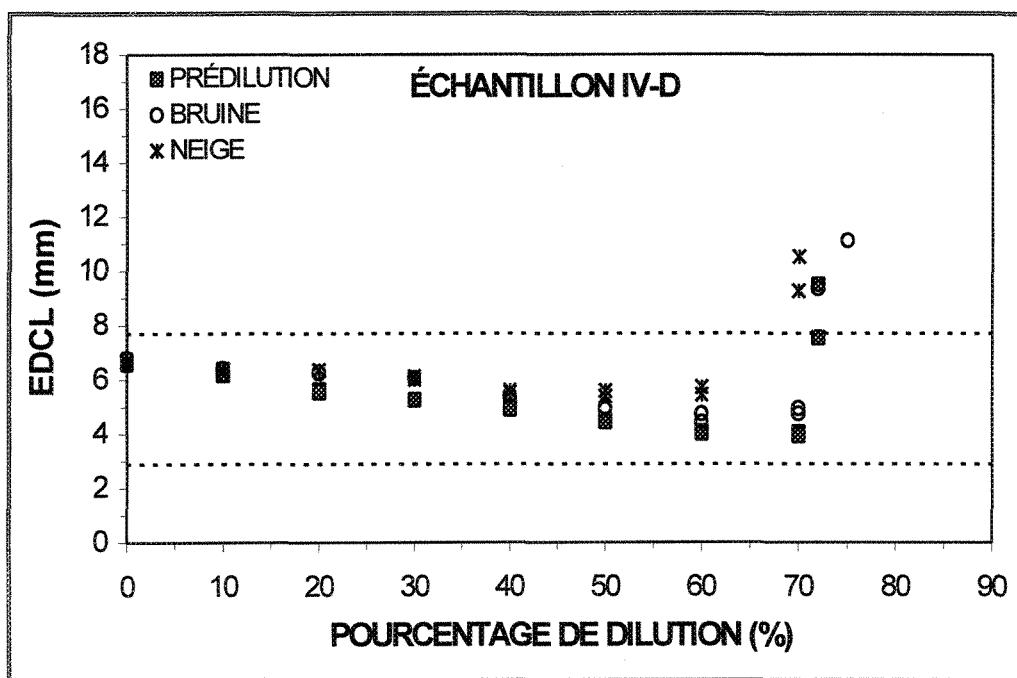
trouvent sensiblement sur la même ligne. Cependant, au-dessus de 40 % de dilution, les deux produits voient les valeurs de l'EDCL augmenter de façon considérable. Dans le cas de l'échantillon I-A (Figure 3.2a), les valeurs de l'EDCL augmentent de 4,5 mm à 10,5 mm et dans le cas de l'échantillon I-B (Figure 3.2b) de 3,5 mm à 12 mm. La limite d'acceptabilité est dépassée pour une dilution valant respectivement 60 % pour l'échantillon I-A, et 70 % pour le produit I-B.

3.3.2 Produits de type II et IV à -10 °C

Les valeurs de l'EDCL à -10 °C des deux produits antigivre de type II et IV, sont représentées aux Figures 3.3a et 3.3b. De façon générale, le produit de type IV présente une performance aérodynamique supérieure à celle du produit de type II. Avec l'échantillon II-C, l'EDCL est supérieur à l'acceptabilité pour les trois types de contamination, à l'exception du produit prédilué dans l'intervalle de dilution compris entre 30 et 60 %. Avec le produit II-C prédilué, il y a diminution régulière de l'EDCL à mesure que la dilution augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne 60 % où elle augmente brusquement au-dessus de la limite acceptable. Pour le produit II-C contaminé par la bruine verglaçante, l'EDCL reste sensiblement constante à 8,5 mm jusqu'à ce que la dilution atteigne 60 %,



a) Échantillon II-C



b) Échantillon IV-D

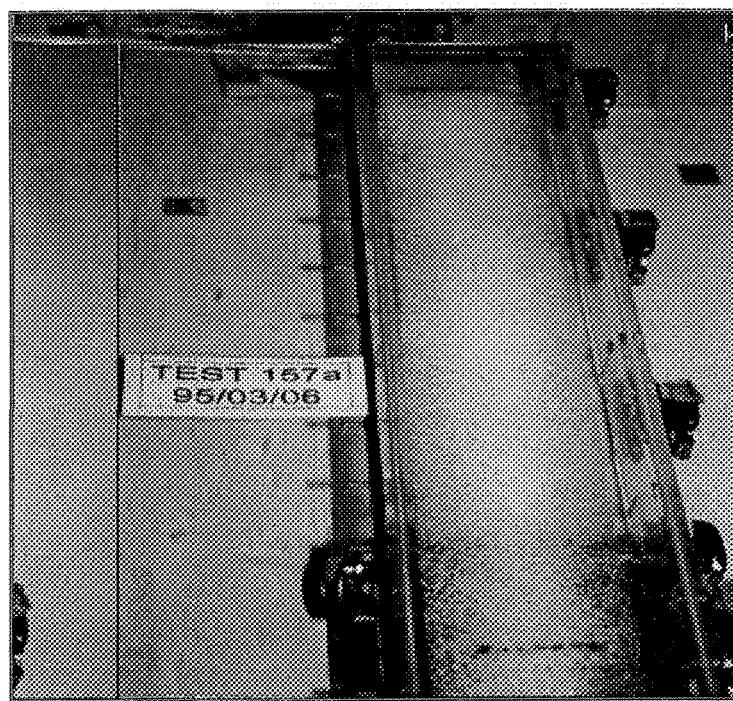
Figure 3.3 EDCL à 30 s mesuré à -10 °C en fonction de la dilution du fluide

où elle augmente alors brusquement de plus de 2 mm comme dans le cas de la prédilution. Pour le produit II-C contaminé par la neige, l'EDCL commence à excéder de 2 mm la limite supérieure acceptable à partir de 40 % de dilution.

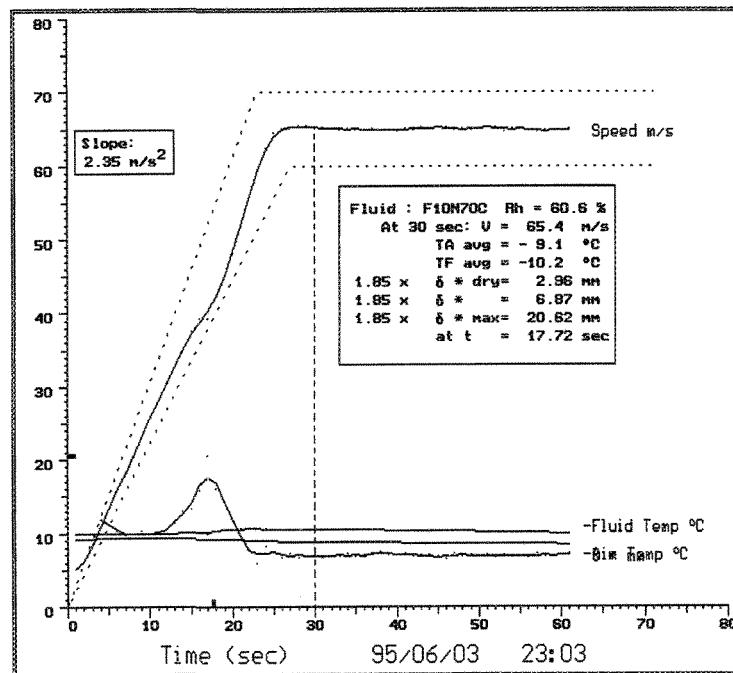
L'échantillon IV-D présente des valeurs de EDCL qui sont en général de 2 mm inférieures à celles mesurées avec l'échantillon de type II. De plus, à l'exception de quelques points en haut de 70 % de dilution, toutes les valeurs restent à l'intérieur du domaine d'acceptabilité et ce, pour les trois types de contaminations étudiées.

3.3.3 Point de congélation et formation de «névasse»

L'augmentation brusque de l'EDCL semble correspondre à la formation de «névasse», un mélange de particules de glace et de fluide, qui augmente la rugosité en surface, rendant l'élimination du produit contaminé plus difficile. De façon à mieux analyser cet effet, des enregistrements vidéo ont été pris lors des différents essais d'élimination. On a aussi noté les niveaux de la dilution équivalente correspondant au point de congélation (où la formation de la première plaquette de «névasse» est observée), ainsi qu'aux couvertures de 50 et 100 % du fluide par la «névasse». Ces derniers seront présentés après la présentation des résultats obtenus à -20 °C. La Photo 3.1 montre le dépôt de



a) Photo avant l'essai



b) Effet sur l'EDCL à 30 sec

Photo 3.1 «Névasse» formée par contamination par la neige à -10 °C (D 70 %)

«névasse» formée à -10 °C en surface du film de fluide de type I-B avec de la neige appliquée à un niveau équivalent de dilution de 70 %. La Photo 3.1a est une photographie prise avant l'essai d'élimination tandis que l'enregistrement de la Figure 3.1b montre l'effet sur l'EDCL occasionné par une telle contamination. La brusque augmentation à 20 s est attribuable à la «névasse» en surface. Le Tableau 3.2 à la page suivante présente les pourcentages de dilution correspondant à la première formation de «névasse» pour les quatre produits testés selon les trois types de contamination.

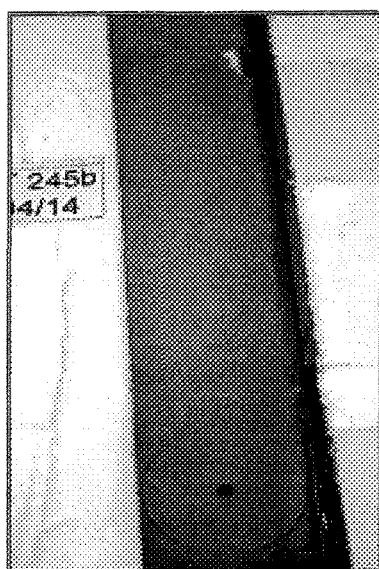
On peut noter ici une différence dans les niveaux de dilution qui sont requis pour obtenir la première apparition de la «névasse». Normalement, lorsque le fluide est exposé sous les précipitations, il y a un gradient de concentration aqueuse, la partie supérieure présentant la plus grande dilution. Avec un niveau de dilution de 10 %, par exemple, le point de congélation du fluide II-C est proche de -10°C pour les tests à -10 °C. Ces niveaux semblent liés aux caractéristiques du fluide et à la nature de la contamination. On remarque en effet que la «névasse» va se former de façon générale à un niveau de dilution plus faible en présence de la dilution dynamique, bruine verglaçante et la neige, que dans le cas de la prédilution. Ceci indique un gradient de concentration important en contexte de contamination dynamique de la bruine verglaçante et de neige.

Tableau 3.2 Pourcentage de dilution à laquelle se forment les premières plaquettes de «névasse» à -10 °C (%)

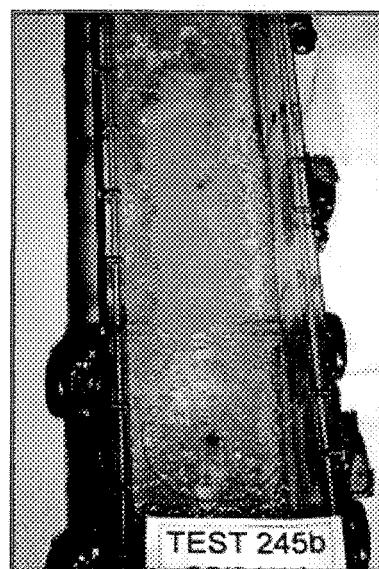
FLUIDE	DILUTION	BRUINE	NEIGE
I-A	54	30	30
I-B	70	20	20
II-C	10	10	10
IV-D	72	72	40

On peut noter également dans le Tableau 3.2 que, exception faite du fluide IV-D, la formation de la «névasse» initiale est observée avec la bruine verglaçante sensiblement au même niveau de dilution qu'avec la neige naturelle. De toute façon, une grande quantité de «névasse» est toujours présente lorsque les valeurs de l'EDCL sont au-dessus de la limite de l'acceptabilité. Donc, la vérification effectuée juste avant le décollage, qui est une pratique courante des lignes aériennes, devrait permettre la détection de cette situation.

Les Photos 3.2 et 3.3 comparent l'état de la «névasse» formée sur le film du fluide II-C contaminé à 40 % par la bruine verglaçante (Photo 3.2) à celle formée par la neige sur le film du fluide I-A (Photo 3.3). Les photos indiquées a et b sont celles prises avant l'essai et 20 secondes après le début de l'essai



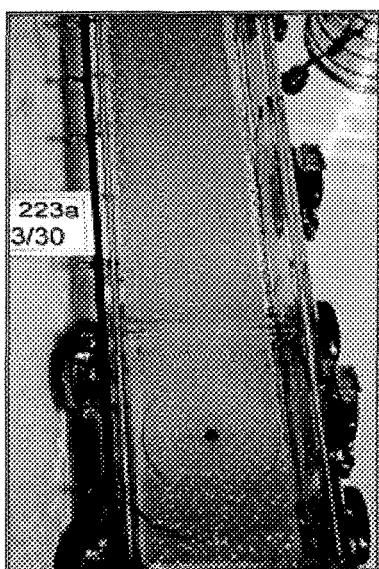
a)



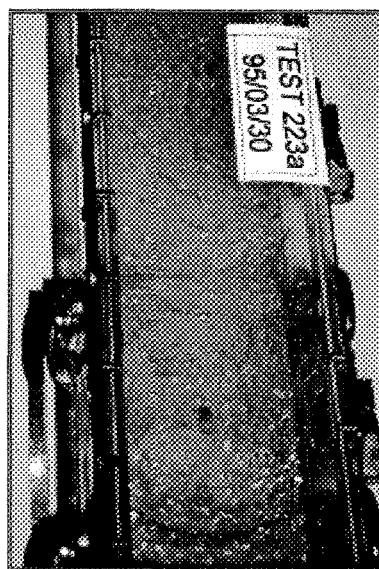
b)

Photo 3.2 Produit II-C contaminé par la bruine verglaçante à -20 °C (D 40 %)

- a) Avant l'essai d'élimination
- b) Après 20 secondes d'élimination



a)



b)

Photo 3.3 Produit I-A contaminé par la neige à -20 °C (D 40 %)

- a) Avant l'essai d'élimination (application de 41,7 g de neige)
- b) Après 20 secondes d'élimination

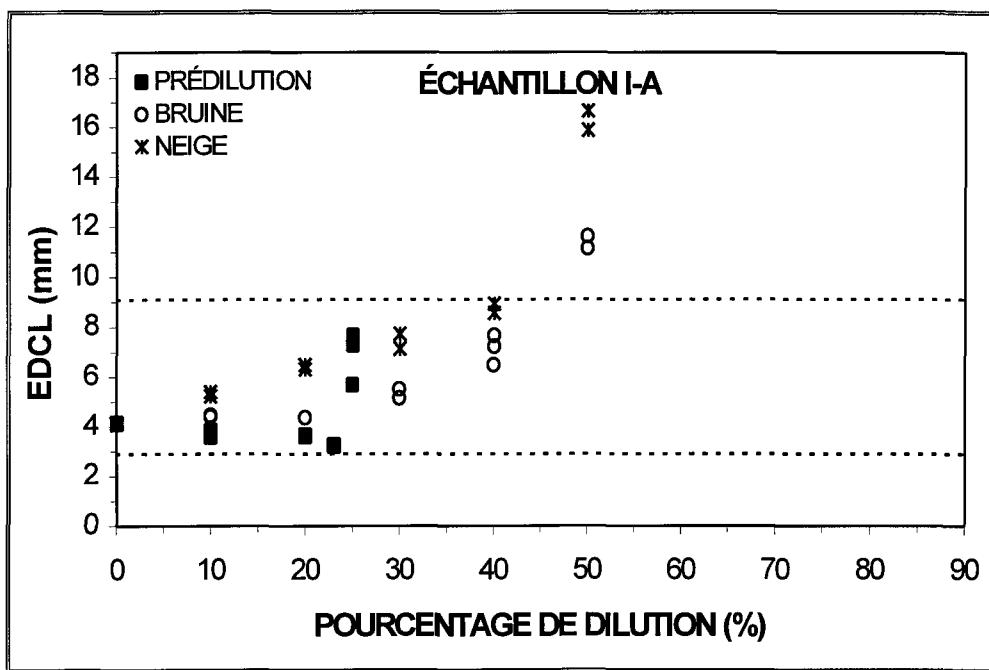
d'élimination. Dans le cas du fluide exposé à la bruine (Photo 3.2), le fluide forme au cours de l'élimination un liquide avec beaucoup de «névasse». La Photo 3.2b montre les vagues formées à la valeur de l'EDCL de 8,70 mm.

3.4 Essais à -20 °C

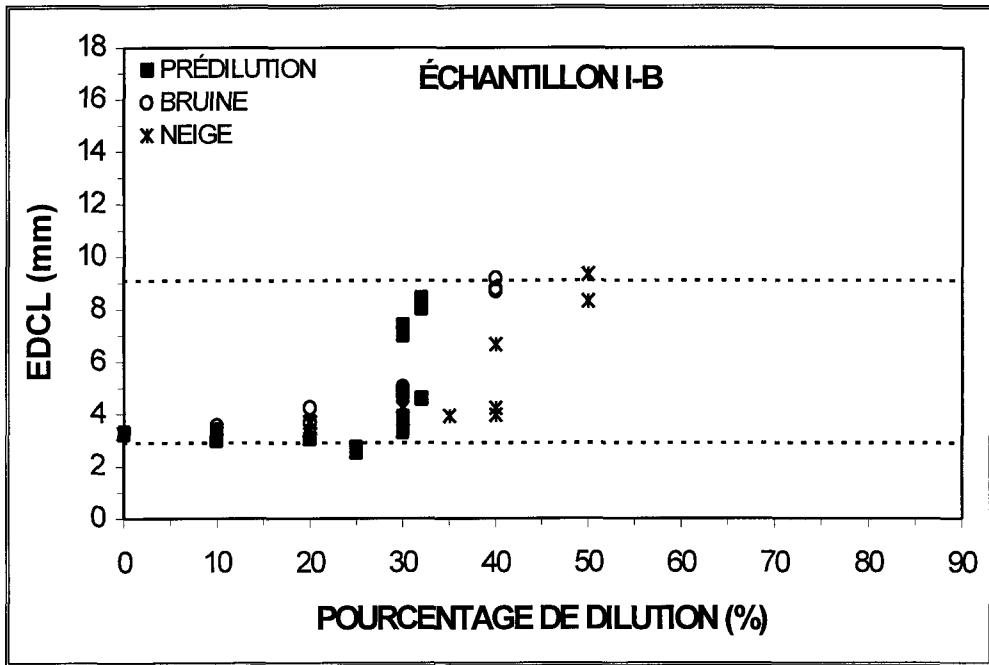
Les comportements aérodynamiques des quatre produits ont été évalués à -20 °C pour étudier l'effet des trois types de contaminations décrits plus haut. Les Figures 3.4 et 3.5 montrent les valeurs de l'EDCL à 30 s mesurées à -20 °C en fonction du pourcentage de dilution correspondant à chaque contamination.

3.4.1 Produits de type I, II et IV à -20 °C

En général, les graphiques de l'EDCL des quatre produits testés à -20 °C font ressortir, pour les trois contaminations, des comportements similaires à ceux observés à -10 °C. La différence principale vient de ce que, au même pourcentage de dilution, les valeurs de l'EDCL des deux fluides sont en général de 2 à 3 mm plus élevées à -20 °C qu'à -10 °C. Pour cette raison, les valeurs mesurées de l'EDCL excèdent la limite d'acceptabilité à un niveau de

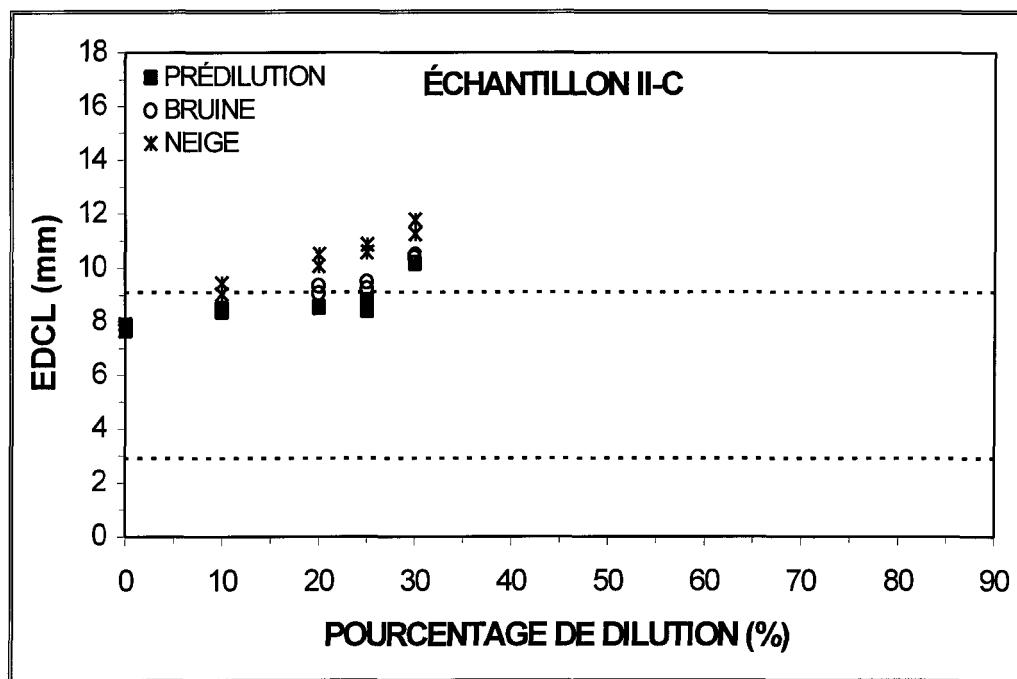


a) Échantillon I-A

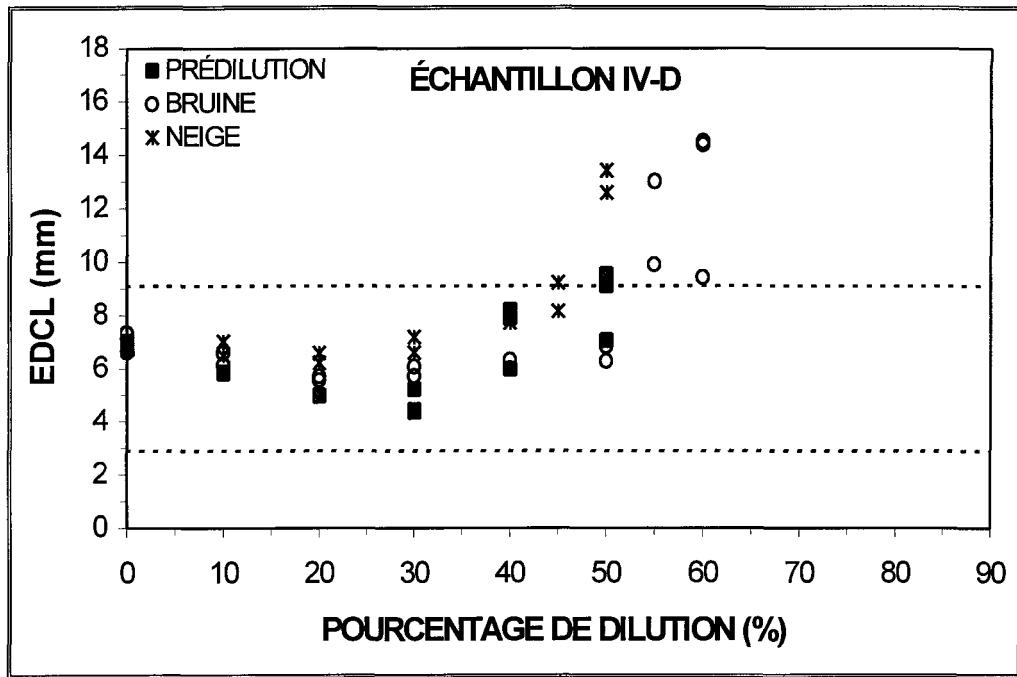


b) Échantillon I-B

Figure 3.4 EDCL à 30 s mesuré à -20 °C en fonction de la dilution du fluide



a) Échantillon II-C



b) Échantillon IV-D

Figure 3.5 EDCL à 30 s mesuré à -20 °C en fonction de la dilution du fluide

dilution de 20 à 30 % plus bas à -20 °C qu'à -10 °C (voir les données du Tableau 3.3). La seule exception est observée avec le produit II-C qui s'est révélé inacceptable sur le plan aérodynamique à -10 °C ainsi qu'à -20 °C.

Tableau 3.3 Pourcentage de dilution à partir duquel la limite d'acceptabilité est excédée

PRODUIT	-10 °C D %	-20 °C D %	ÉCART
I-A	60	40	20
I-B	70	40	30
II-C	10	10	0
IV-D	70	50	20

La performance du produit antigivre IV-D est de beaucoup supérieure à celle du fluide II-C. Comme dans le cas des produits de type I, la diminution de la température va avoir pour effet de diminuer le niveau de la dilution pour laquelle l'EDCL dépasse la limite d'acceptabilité. Par exemple, dans le cas du fluide II-C, les valeurs de l'EDCL excèdent la limite de l'acceptabilité lorsque le niveau de dilution atteint 10 % à -20 °C et 20 % à -10 °C. Dans le cas de fluide IV-D, le niveau de la dilution où la limite acceptable est dépassée se trouve diminué à 70 % à -10 °C et à 50 %, à -20 °C.

3.4.2 Point de congélation et formation de «névasse»

Comme dans les essais à -10 °C, la perte de performance aérodynamique du fluide de type II à -20 °C, qu'il soit prédilué, contaminé par la neige ou la bruine verglaçante, peut être expliquée par l'augmentation du point de congélation du fluide en surface amenant la formation de dépôts de «névasse» au-dessus du fluide. Le Tableau 3.4 donne la dilution correspondant à la première plaquette de «névasse» observée visuellement dans les tests réalisés à -20 °C.

A -20 °C, on peut noter une différence entre les trois types de contamination. C'est avec le fluide dilué que la «névasse» va apparaître au niveau de dilution le plus élevé alors que c'est avec les gouttelettes surfondues de bruine verglaçante que la «névasse» va se former au pourcentage de dilution le plus faible. Quant aux particules de neige, elles forment de la «névasse» visible à un niveau de dilution dynamique égale, ou de 10 % moins élevé à celui observé dans le cas des gouttelettes surfondues de bruine. Cette différence serait attribuable au processus même de formation de la «névasse», qui reste particulier au type de contamination impliqué. La «névasse» est un mélange hétérogène constitué de fluide partiellement dilué et de particules de glace.

Tableau 3.4 Pourcentage de dilution à laquelle se forme la première plaquette de «névasse» à -20 °C

Fluide	Dilution %	Bruine %	Neige %
I-A	25	10	10
I-B	32	10	20
II-C	30	10	10
IV-D	40	10	20

a) Cas des fluides prédilués

Avec les fluides dilués, la «névasse» peut se former lorsque le produit commence à geler, soit dans les deux situations suivantes :

- 1) Lors de l'application du fluide avant l'essai d'élimination.
- 2) Durant l'essai d'élimination.

Dans le premier cas, pour que la «névasse» se forme en surface du fluide, il faut que le fluide soit appliqué à une température très voisine du point de congélation du fluide dilué. Si la température de la plaque du tunnel est en bas du point de congélation du fluide appliqué, tout le film se congèlera pour

produire une couche de glace solide avec au-dessous un liquide constitué de fluide concentré. Dans ce cas, on ne procède pas à l'essai d'élimination.

Si la température de la plaque est voisine du point de congélation du fluide dilué appliqué, le fluide peut être maintenu à l'état surfondu. Dans ce cas, la congélation du film du fluide d'élimination peut être amorcée au cours de l'essai. La surfusion et l'état relativement homogène du fluide prédilué pourraient expliquer l'observation de «névasse» visible à un niveau de dilution plus élevé qu'avec les deux autres types de contamination.

b) Contamination par la bruine verglaçante.

Avec la bruine verglaçante, les gouttelettes sont à l'état surfondu lorsqu'elles pénètrent la couche du film où elles vont diffuser. Si le fluide est un film très mince, ce qui est le cas des produits de type I, elles vont rebondir et se briser alors en gouttelettes plus petites qui vont être absorbées à la surface du fluide. Il se développe alors un gradient de concentration aqueuse dans la couche du fluide en surface de la plaque, la partie supérieure présentant une plus grande dilution que la partie sous-jacente. Cette stratification expliquerait pourquoi on observe les premières plaquettes de «névasse» à un niveau de dilution de 15 à 30 % plus faible que dans le cas de la prédilution où le film de fluide est beaucoup plus homogène.

c) Contamination par la neige

Dans le cas de la neige, la «névasse» va se former lorsque les particules de glace se dissolvent partiellement, soit en raison d'un taux de précipitation plus élevé que le taux de dissolution, soit parce que la température du fluide est au voisinage de son point de fusion.

Comme on peut le constater, le processus de formation de la «névasse» diffère selon que le fluide avant l'essai d'élimination est parfaitement homogène (cas de la prédilution) ou stratifié avec une couche de «névasse» en surface (cas de la contamination par gouttelettes surfondues et cas de la neige). Ces processus seront reconstruits avec plus de détails dans la discussion qui suit au chapitre 4.

3.5 Essai avec «névasse» artificielle

Ces essais visent à reproduire la condition de la «névasse» accumulée sur la piste d'envol qui est projetée sur l'aile d'un avion lorsque ce dernier accélère avant le décollage. Pour les fins de ces essais, de la «névasse» artificielle a été fabriquée en mélangeant de la neige naturelle, ramassée à l'extérieur, avec une certaine quantité de produits chimiques commerciaux déverglaçants pour pistes d'aéroport. Les proportions retenues pour le mélange

sont les suivantes : 6 ml du produit déverglaçant, 100 ml de neige et 20 ml d'eau. On obtient alors une «névasse» artificielle de consistance comparable à celle formée en conditions naturelles. La densité de la «névasse» fabriquée est de 0,81 g/ml; ainsi, 20 g de «névasse» appliquée sur le fond de la veine d'essai du BLDT-mètre équivalent à une couche de 0,32 mm d'épaisseur. L'application de la «névasse» en tas se fait à la main de façon à la répartir également à différents points sur la surface. Après l'application, on referme le couvercle de la veine d'essai, et l'essai d'élimination est alors démarré.

Les effets de la contamination par la projection de la «névasse» artificielle ont été étudiés à -10 °C avec les produits I-A, II-C, II-C 50/50, et IV-D. Des essais ont également été effectués avec de la «névasse» artificielle appliquée directement sur le fond du BLDT-mètre. Les valeurs de l'EDCL mesurées à -10 °C sont présentées à la Figure 3.6 en fonction de la masse de «névasse» artificielle appliquée. L'ensemble des résultats est donné en annexe.

Pour les dilutions des produits I-A, et II-C (50/50), les valeurs de l'EDCL fluctuent de façon irrégulière, mais restent inférieures à 8 mm. En général, ces valeurs tendent à augmenter avec l'augmentation de la masse de «névasse» déposée. Avec l'échantillon I-A, où 50 g de «névasse» est

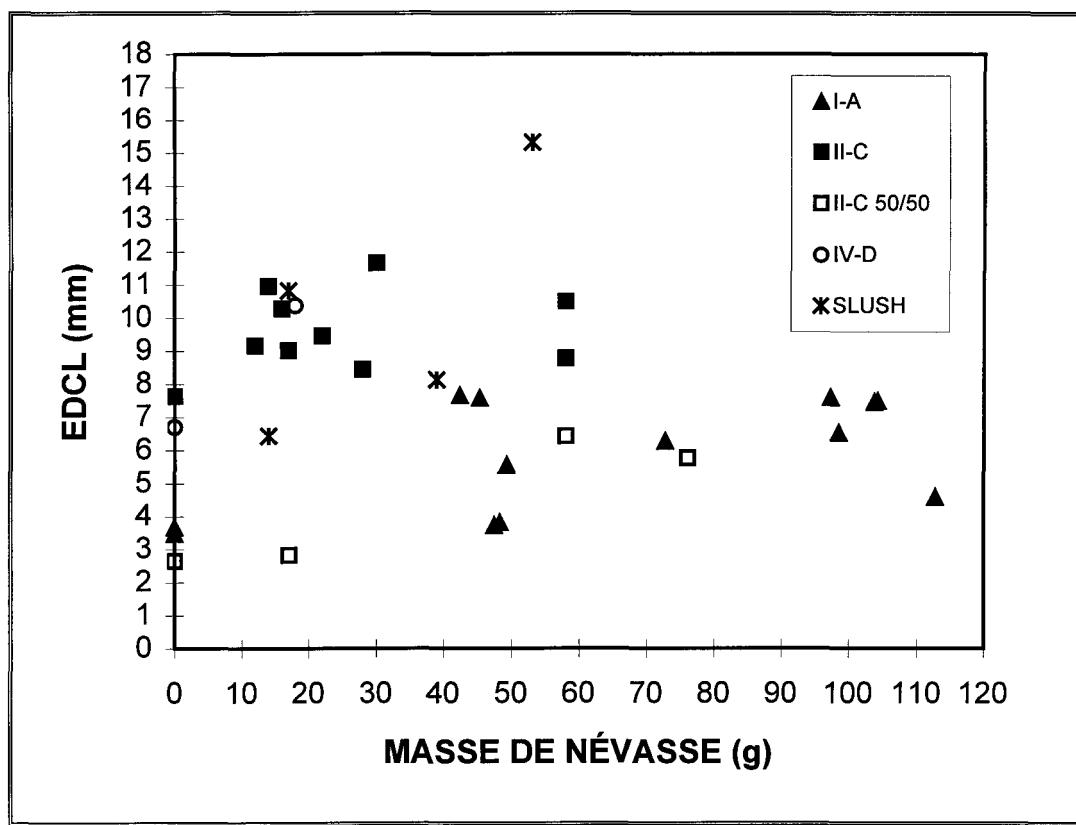


Figure 3.6 EDCL en fonction de la masse de la projection de «nèvasse»

appliquée, les valeurs de EDCL présentent une grande variation; ainsi on a mesuré un EDCL de 7,7 mm pour 42,4 grammes de «nèvasse»; de 3,8 mm pour 48,3 grammes de «nèvasse»; et de 4,6 mm pour 112,8 grammes de «nèvasse». Avec l'échantillon II-C dilué à 50/50, les valeurs de l'EDCL varient également : on obtient 6,4 mm pour 58 grammes de «nèvasse» et 4,8 mm pour 181 grammes de «nèvasse». Observons qu'avec le fluide de type I, les plaquettes de «nèvasse» sont éliminées plus facilement qu'avec le fluide de type II. Ce phénomène semble dépendre de la fluidité et de l'adhérence

visqueuse de la «névasse». Ainsi, avec de la «névasse» adhérant à la plaque plane, la valeur de l'EDCL augmente.

CHAPITRE 4

4. Discussion des résultats

Ce chapitre discute des résultats présentés au chapitre 3 pour tenter d'expliquer le comportement du fluide en présence de contamination par les précipitations. On distinguera durant la phase d'accélération, les effets de la prédilution de ceux de la dilution par contamination. Ce chapitre discute également des échanges thermiques en jeu lors de la dissolution des particules de glace et de neige dans les produits liquides.

4.1 Dynamique du fluide lors de son élimination

On peut décomposer le comportement du fluide lors de son élimination en quatre périodes successives qui sont décrites ci-après.

4.1.1 Première période

Dans la première période, la vitesse du vent varie de la vitesse initiale de 5 m/s à la vitesse à laquelle le fluide est mis en mouvement; cette vitesse, dite

critique, est comprise entre 10 m/s et 15 m/s. Il n'y a aucun mouvement du fluide durant cette période, car le fluide est stationnaire en raison des forces visqueuses élevées, particulièrement pour les fluides de type II et IV.

4.1.2 Seconde période

La seconde période est celle où le fluide commence à se mouvoir, soit aux vitesses comprises entre 15 m/s et 24 m/s selon le fluide; la viscosité du fluide prédilué et dilué par la précipitation est alors encore très élevée et son épaisseur est proche de son épaisseur initiale de 1,5 mm. Cette période, qui précède la formation des vagues, dure de 2 à 4 secondes environ. Dans le cas des fluides de type II et IV, le fluide ne commence à se mouvoir que lorsque sa viscosité a diminué.

4.1.3 Troisième période

La troisième période est celle où il y a formation des vagues en surface du film de fluide jusqu'à la fin du test. Les vagues sont générées alors que l'écoulement passe du régime laminaire au régime turbulent, et que la vitesse excède la vitesse critique comprise entre 15 m/s et 24 m/s. C'est au cours de cette période que l'EDCL atteint sa valeur maximale et que survient la majeure partie de

l'élimination du fluide et des particules de glace dont sont constituées la «névasse» et la neige (voir les données du Tableau 4.1).

Tableau 4.1 Pourcentage d'éliminations obtenues à -10 °C

D (%)	E (%)			
	I-A	I-B	II-C	IV-D
0	97	99	89	95
10	98	99	87	95
20	98	99	86	94
30	99	99	85	95
40	99	99	88	96
50	99	99	88	98

Le phénomène prédominant pendant cette période est le comportement de la «névasse». Le fluide fortement contaminé se présente sous forme d'une couche double : la «névasse» en surface et le fluide lui-même en sous-couche. L'élimination du fluide se fait alors en deux temps : d'abord la «névasse» est entraînée par le vent et ensuite le fluide est éliminé.

L'observation de ce phénomène a montré que l'élimination de la «névasse» se produisait de la façon suivante. Des morceaux de «névasse» situés sur le premier quart de la plaque dans le sens du vent commencent à bouger en effectuant des petits mouvements selon l'action des tourbillons de l'air. Ces faibles déplacements libèrent de petites zones de fluide qui sous l'effet du cisaillement de l'air contiennent moins de «névasse» en surface. Dans ces zones, le fluide forme alors en surface une vague qui entraîne d'autres morceaux de «névasse». Très

souvent, ce morceau de «névasse» se détache complètement du fluide et s'envole, entraîné par le vent. Le phénomène se répète tout au long de la plaque au fur et à mesure que le fluide se libère de la «névasse». Selon l'épaisseur et la forme de la «névasse», la vitesse d'air requise pour en déplacer des morceaux est variable, et par conséquent, le temps auquel le phénomène commence à se produire varie d'un essai à l'autre.

Par contre, dès que le premier morceau de «névasse» s'est détaché, le fluide se libère de la «névasse» très rapidement. Durant cette période, la hauteur des vagues atteint une valeur maximale, de l'ordre de grandeur du maximum observé sur l'enregistrement de l'EDCL.

4.1.4 Quatrième période

La quatrième période est celle où le fluide, en majeure partie éliminé, se déplace sur la plaque à une vitesse très faible. Cette période correspond à celle où l'avion quitte le sol, soit à une vitesse de 65 m/s atteinte 30 secondes après le début de l'accélération.

Les temps et les vitesses caractéristiques aux quatre périodes sont illustrés avec l'échantillon I-A évalué à -10 °C avec contamination par la neige et dont les valeurs sont données au Tableau 4.2 ci-après.

Tableau 4.2 Durées T et vitesses V caractérisant les quatre périodes observées avec l'échantillon I-A contaminé par la neige à -10 °C

FLUIDE	D %	1 ^e PÉRIODE		2 ^e PÉRIODE		3 ^e PÉRIODE		4 ^e PÉRIODE	
		V ₁ m/s	t ₂ s	V ₂ m/s	δ* _{max} mm	t (s) à δ* _{max}	E %	δ* mm	
I-A	0	15	3	20	11,71	8	98	4,36	
	10	15	3	20	10,63	8	98	4,27	
	20	15	4	24	10,37	9	98	4,46	
	30	15	2	18	11,65	7	97	4,61	
	40	15	3	20	11,96	8	99	4,46	
	50	Donnés non disponibles à cause de la turbulence			14,54	14	98	4,76	
	54				16,97	16	98	5,84	
	56				16,34	17	99	7,59	
	60				15,98	20	100	6,40	
	65				17,16	21	100	8,17	
	68				17,34	23	100	6,10	

V₁ : Vitesse à laquelle le fluide se met en mouvement.

t₂ et V₂ : Temps et vitesse à laquelle vagues commencent à se former.

t (s) : Temps à δ*_{max}.

On remarque que plus la valeur de la dilution augmente, plus le temps mis pour obtenir la hauteur maximale des vagues, correspondant au maximum de l'EDCL, s'approche de la valeur de 30 secondes, soit le temps où l'avion quitte le sol. Ainsi, pour une contamination équivalente à une dilution de 10 %, le maximum de l'EDCL de 11,7 mm est atteint à 8 secondes. Pour les dilutions de 54 %, et de 68 %, les maxima de l'EDCL de 17 mm et 17,3 mm sont atteints à 16 et 23 secondes respectivement. On notera qu'à 54 % de dilution (ce pourcentage est en caractères gras), on observe la formation des premières plaquettes de «névasse».

Les Tableaux 4.3a et 4.3b illustrent le cas du fluide I-A dans les conditions de contamination avec la bruine verglaçante (Tableau 4.3a) et celles de la prédilution (Tableau 4.3b).

Tableau 4.3 Temps et vitesses caractérisant les quatre périodes d'élimination

a) Échantillon I-A exposé à la bruine à -10 °C

FLUIDE	D %	1 ^e PÉRIODE		2 ^e PÉRIODE		3 ^e PÉRIODE		4 ^e PÉRIODE	
		V ₁ m/s	t ₂ S	V ₂ m/s	δ _{max} mm	t (s) à δ* _{max}	E %	δ* mm	
I-A	0	15	3	20	11,72	8	98	4,44	
	10	15	3	20	10,84	8	97	4,79	
	20	15	4	24	9,84	9	97	4,64	
	30	15	2	18	11,28	7	98	4,58	
	40	15	2	20	10,00	7	98	4,14	
	45	15	4	24	11,65	9	99	4,16	
	50	15	2	19	11,59	7	99	5,66	
	54	15	9	37	11,70	14	99	5,03	
	60	Turbulent			12,36	21	99	8,05	

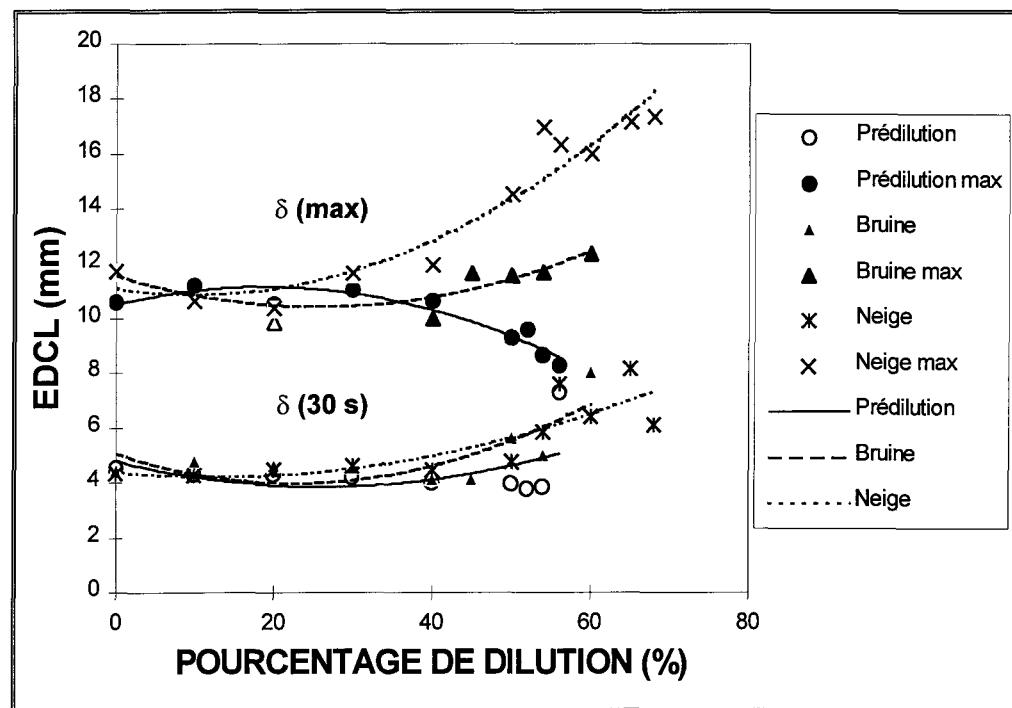
b) Échantillon I-A prédilué

FLUIDE	D %	1 ^e PÉRIODE		2 ^e PÉRIODE		3 ^e PÉRIODE		4 ^e PÉRIODE	
		V ₁ m/s	t ₂ S	V ₂ m/s	δ _{max} mm	t (s) à δ* _{max}	E %	δ* mm	
I-A	0	15	4	21	10,60	9	96	4,53	
	10	15	3	18	11,21	7	98	4,29	
	20	15	1	15	10,52	6	98	4,31	
	30	15	1	17	11,03	6	99	4,19	
	40	15	1	17	10,65	6	99	4,01	
	50	15	1	16	9,27	6	99	3,97	
	52	15	2	18	9,57	7	99	3,77	
	54	15	3	22	8,64	8	99	3,85	
	56	Turbulent			8,27	25		7,31	

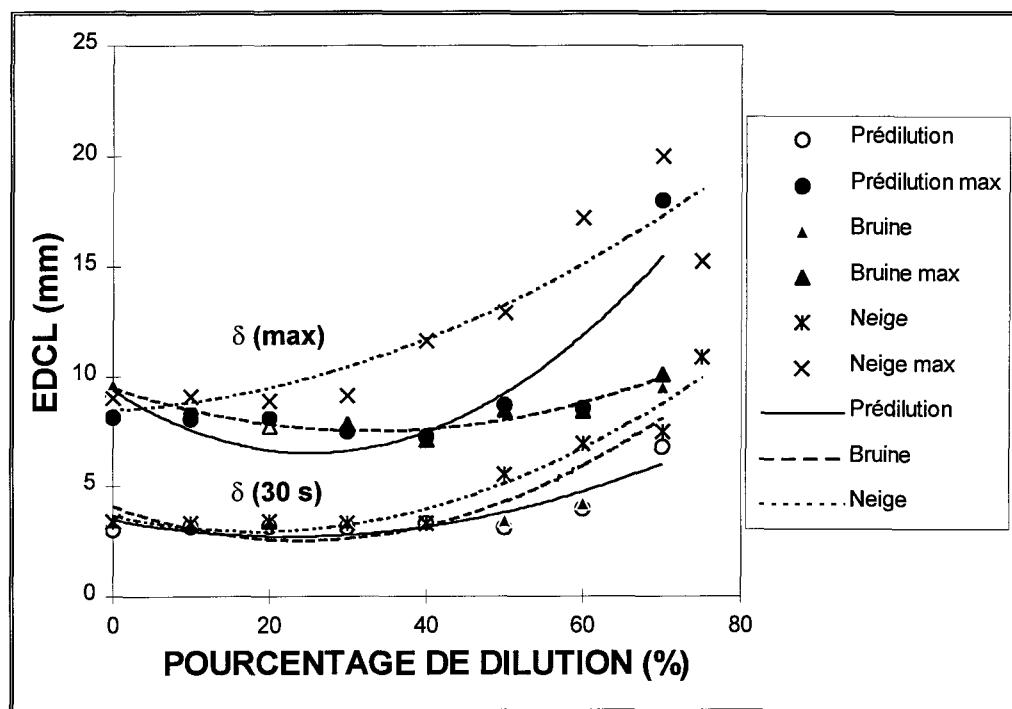
On note aux Tableaux 4.3a et 4.3b qu'avec le fluide I-A dans la condition où il n'y a pas de «névasse» formée, les valeurs du temps mis pour atteindre la hauteur maximale des vagues (maximum de l'EDCL) sont comprises entre 6 et 9 secondes, les valeurs les plus élevées correspondant à la contamination par la bruine verglaçante. Dans le cas du fluide I-A prédilué (Tableau 4.3b), on remarque que le maximum décroît à mesure qu'augmente le pourcentage de dilution. Dans le cas du fluide I-A exposé à la bruine verglaçante, le maximum reste sensiblement le même à l'erreur expérimentale près.

Dans la condition où il y a formation de «névasse», correspondant au niveau de dilution de 50 % (présenté en caractères gras), on note une brusque remontée du maximum de la hauteur des vagues.

Les différences entre les quatre produits évalués dans le cadre de ce travail sont illustrées aux graphiques des Figures 4.1a, b, c et d, où sont comparées pour les quatre produits les valeurs de l'EDCL mesurées au maximum de l'enregistrement (courbe du haut) et à 30 sec. (courbe du bas) correspondant au décollage.

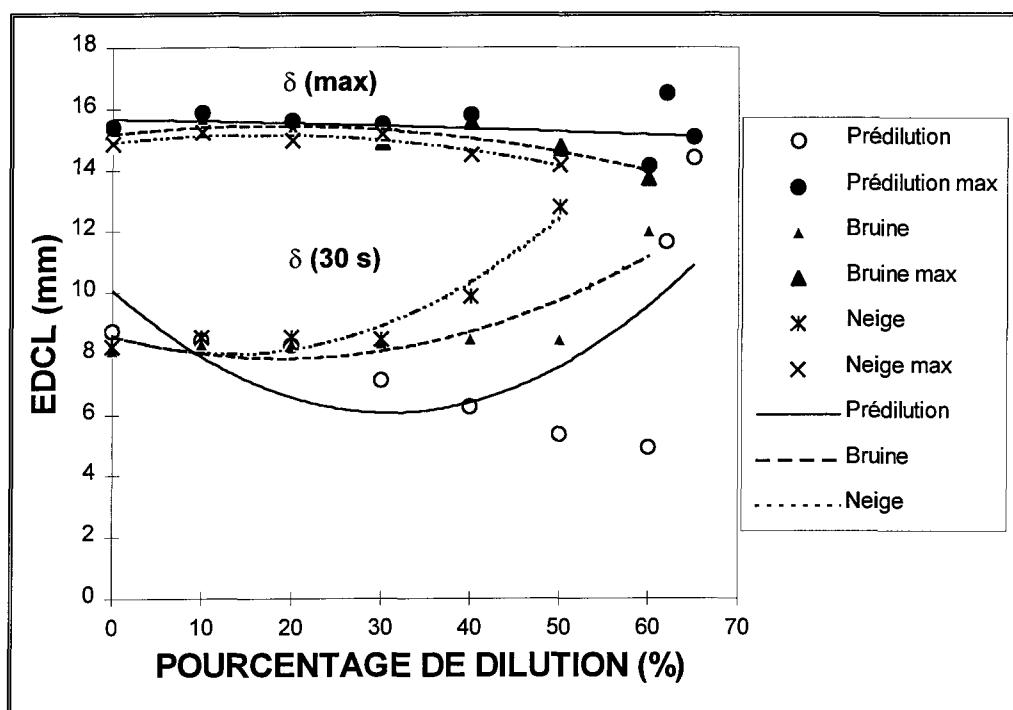


a) Échantillon I-A

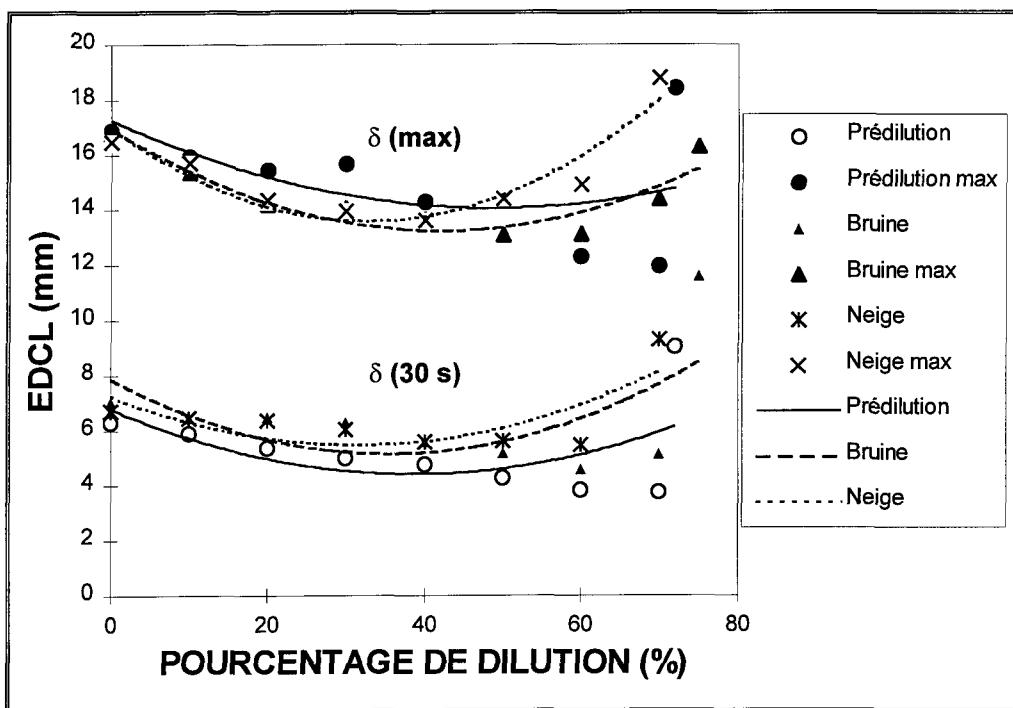


b) Échantillon I-B

Figure 4.1 δ^* (max) et δ^* (30 s) en fonction du niveau de dilution



c) Échantillon II-C



d) Échantillon IV-D

Figure 4.1 δ^* (max) et δ^* (30 s) en fonction du niveau de dilution

4.2 Performance aérodynamique au moment du décollage

4.2.1 Prédilution

Dans le cas de la prédilution, le fluide dilué constitue un mélange homogène où l'eau et le glycol sont en solution. De façon générale, la viscosité de ce mélange augmente avec une diminution de la température et diminue avec une augmentation du pourcentage de dilution. La diminution de température augmente généralement la viscosité, donc la valeur de l'EDCL tandis qu'à température constante, une diminution de viscosité va contribuer à diminuer la valeur de l'EDCL, c'est-à-dire la pénalité aérodynamique. C'est ce qui est observé aux Figures 4.1a, b, c et d correspondant aux fluides dilués.

Les résultats obtenus avec les quatre fluides montrent que plus la température décroît, plus les valeurs de l'EDCL sont élevées.

4.2.2 Dilution dynamique

Les fluides utilisés dans cette étude ont une densité légèrement supérieure à 1, donc légèrement supérieure à celle de l'eau. Lorsque l'eau provenant des précipitations telles la bruine ou les particules de glace entre en contact avec le fluide, deux phénomènes se produisent : le premier est celui de la diffusion de

l'eau dans le fluide, qui va augmenter la dilution du fluide et diminuer la concentration en glycol. Le second est la dissolution des particules de glace. Lorsque la dissolution est partielle, il se produit une couche de «névasse» superposée au film fluide.

Les deux phénomènes sont illustrés avec les données obtenues avec le fluide I-A, présentées au Tableau 4.4. Les pourcentages de dilution sont ceux obtenus après différents temps d'exposition à une bruine de 24 g/dm²/h dans le cas de la contamination avec les gouttelettes surfondues et après application de quantités prédéterminées de neige dans le cas de la contamination par la neige. Ainsi, le niveau de 30 % de dilution est atteint après 11,3 minutes d'exposition à une précipitation surfondue de 24 g/dm²/h et après une application de 31,3 g de neige en surface d'un film de fluide de 1,05 mm d'épaisseur.

Dans le cas de la contamination par la bruine, au niveau de 30 % de dilution, on observe avant l'essai d'élimination une petite quantité de «névasse» formée en surface du fluide. Après l'essai d'élimination, il reste une mince film de fluide résiduel sur la plaque et l'EDCL vaut 4,58 mm. Au niveau de 60 % de dilution, après l'exposition aux gouttelettes surfondues, la dissolution des particules de glace n'est que partielle et le film de fluide présente alors une couche de «névasse» en surface (20 %). Cette «névasse» est plus difficile à éliminer. De sorte qu'après l'essai d'élimination, il reste encore une certaine quantité

«névasse» sur la plaque. Ceci va faire augmenter l'EDCL qui monte alors à 8,05 mm.

Tableau 4.4 État du fluide I-A contaminé avec la bruine et la neige

Contamination	D % ⁽¹⁾	P ₀ ⁽²⁾	P ₁ ⁽³⁾	P ₂ ⁽⁴⁾	δ* ⁽⁵⁾ mm
Bruine	30	L ⁽⁶⁾	L+S(p)	L	4,58
	40	L	L+S(p)	L	4,14
	50	L	L+S(p)	S(p) ⁽⁷⁾	5,66
	60	L	L+S(p)	S(p)	8,05
Neige	30	L+S(p)	L+S(p)	L	4,61
	40	L+S(m)	L+S(m)	L	4,46
	50	S(b) ⁽⁸⁾	S(b)	L	4,76
	60	S(b)	S(b)	L	6,40

(1) D : Pourcentage de dilution équivalente.

(2) P₀ : État du fluide avant précipitation.

(3) P₁ : État du fluide après précipitation.

(4) P₂ : État du fluide après l'essai d'élimination.

(5) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(6) L : Liquide.

(7) S(p) : Un peu de «névasse» (moins de 20 %).

(8) S(b) : Beaucoup de «névasse» (plus de 80 %).

4.2.2.1 Contamination par la neige

Le Tableau 4.4 illustre également les phénomènes de diffusion et de dissolution observée avec l'échantillon I-A, à la température de -10 °C dans les

cas de la bruine et de la neige. Au niveau équivalent à 30 % de dilution, en se basant sur l'état du fluide observé avant l'essai, le fluide présente comme dans le cas de la bruine un peu de «névasse», ce que se traduit par un EDCL identique de 4,6 mm pour la neige et la bruine à l'erreur expérimentale près. Au niveau équivalent à 60 % de dilution, la quantité de «névasse» observée avant l'essai d'élimination est beaucoup plus grande avec la neige (50%) qu'avec la bruine verglaçante (20%). Cette «névasse» s'élimine cependant totalement lors l'essai, ce qui n'est pas le cas avec la «névasse» formé en présence de gouttes surfondues.

4.3 Formation de la «névasse»

Comme les mesures de l'EDCL le font ressortir, la présence de «névasse» et ses caractéristiques d'élimination constituent les principaux facteurs pour expliquer l'augmentation de la perte de portance observée. Il apparaît opportun de discuter plus en profondeur du contexte dynamique de formation de la «névasse», qui sont particuliers aux trois modes de contamination étudiés dans ce travail.

4.3.1 Cas du fluide prédilué sans contamination extérieure

Dans le cas du fluide prédilué sans contamination extérieure, la «névasse» peut se former en cours de l'essai d'élimination par congélation spontanée ou partielle du fluide en surface.

4.3.2 Cas de la bruine

Dans le cas de bruine verglaçante, quand une gouttelette d'eau surfondue entre en contact avec le fluide, cette dernière va diffuser dans le fluide. La diffusion complète de toute la gouttelette dans le fluide, requiert un certain temps qui dépend de l'épaisseur du fluide et de son taux de diffusion dans le fluide.

Connaissant l'épaisseur initiale $\varepsilon(0)$ du fluide et du coefficient de diffusion de l'eau dans le fluide, il est possible de donner un ordre de grandeur du temps nécessaire pour obtenir un mélange homogène en utilisant la relation suivante (De Sy, A., Vidts, J., 1968)

$$t = \frac{\varepsilon(0)^2}{D} \quad (4.1)$$

où $\varepsilon(0)$ = Hauteur de mélange de l'eau avec le fluide égale à 1,5 mm.

t = Temps pour obtenir un fluide homogène.

D = Coefficient de diffusion de l'eau dans le fluide.

Le nombre ε / \sqrt{Dt} correspond à une diffusion donnant un mélange homogène à 63 %. Pour un mélange homogène à 95 %, les temps sont quatre fois plus longs.

On ne tiendra pas compte ici du fait que le coefficient de diffusion augmente avec la concentration de glycol.

Le Tableau 4.5 présente les valeurs des coefficients de diffusion de l'eau dans les fluides étudiées. Les données à + 4 °C et + 23 °C sont celles qui ont été mesurées à ces températures (Zouzou, 1996) tandis que celles à -10 °C et à -20 °C sont les valeurs qui ont été extrapolées à partir des deux mesures précédentes en utilisant une fonction exponentielle classique (équation 4.2). Les valeurs constantes D₀ et Q ont été déterminées à partir des données mesurées à +4 °C et +23 °C :

Tableau 4.5 Coefficient de diffusion de l'eau dans les fluides étudiés

FLUIDE*	$10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$						Q cal/mole
	D(T ₁) +23 °C	D(T ₂) +4 °C	(D ₀) -10 °C	D(T ₃) -10 °C	(D ₀) -20 °C	D(T ₄) -20 °C	
I-A	4	2	1,97	1,13	1,28	0,72	2991,19
I-B	6	3	2,97	1,7	1,93	1,08	2991,19
II-C	4,5	1,5	1,32	0,6	0,67	0,3	4740,92
IV-D	8,0	3,5	3,38	1,76	2,02	1,03	3567,42
MIL	4	1	0,77	0,316	0,32	0,13	5982,37

*Les quatre fluides testés contiennent entre 50 et 60 % de glycol;

Le fluide de référence MIL contient 90 % de propylène glycol.

$$D(T) = D_0 \times e^{-Q/RT} \quad (4.2)$$

D(T) = Le coefficient de diffusion à température T (cm²/s).

T = La température absolue (K).

D₀ = Constante de proportionnalité (cm²/s).

Q = Énergie d'activation de la diffusion (cal/mole).

R = Constante universelle des gaz (1,986 cal/g·mole·K).

Le Tableau 4.6 présente les temps de diffusion requis pour obtenir un film homogène. Ces derniers ont été calculés à partir de l'équation 4.1 en utilisant les valeurs respectives données au Tableau 4.5 à -10 °C et -20 °C.

Tableau 4.6 Valeurs estimées des temps de diffusion requis pour obtenir un film constituant un mélange homogène

FLUIDE	$\epsilon(0)$ mm	t (-10 °C) min.	t (-20 °C) min.
I-A	1,5	332	130
I-B	1,5	220	87
II-C	1,5	624	313
IV-D	1,5	212	91
MIL	1,5	1184	721

Les temps pour obtenir la diffusion sur 1,5 mm sont plus grands à -20 °C qu'à -10 °C comme on doit s'y attendre. Les valeurs calculées qui varient entre 87 minutes (cas du fluide I-B à -20 °C) à 624 minutes (cas du fluide II-C à -20 °C), sont bien plus élevées que la durée de la précipitation à 24 g/dm²h produisant le niveau de dilution nécessaire à la formation de la «névasse» (respectivement 19 et 30 minutes pour 50 % et 80 % de dilution selon les données du Tableau 2.4).

Les temps de 19 et 30 minutes sont donc tous de beaucoup inférieurs au temps requis pour obtenir un mélange homogène (le plus court est de 87 minutes). Comme on peut le voir, il n'y a que lors de la prédilution que la diffusion peut être la plus complète étant donné que le mélange se fait mélange mécanique. Il

convient de signaler que les échantillons I-B et IV-D qui ont les temps de diffusion les plus courts 87 et 91 minutes, sont ceux qui présentent les meilleures performances sur le plan aérodynamique.

Quant au fluide II-C, dont les temps de diffusion sont les plus longs, (si on ne considère pas le fluide de référence), il est celui qui présente la pire performance aérodynamique.

4.4 Dissolution de particules de glace

Dans le cas des essais de contamination par la neige, le fluide avant l'essai présente deux états, ceux d'un liquide monophasique et d'un mélange hétérogène de particules de glace, de fluide et de «névasse». Pour que les particules de neige se dissolvent dans le fluide pour former la «névasse», il faut un apport de chaleur, qui contribue à abaisser la température du fluide.

Cette diminution de température du fluide attribuable au phénomène de dissolution est illustrée au Tableau 4.7 suivant où l'on présente les variations de température mesurées avec le produit I-A lors des essais d'élimination à -10 °C dans les conditions de prédilution, de contamination par la bruine verglaçante et

Tableau 4.7 Variation de température ($T_f - T_a$) observée avec le produit I-A à -10 °C lors de l'essai d'élimination

Fluide	D % ⁽¹⁾	T_f (°C) ⁽²⁾	T_a (°C) ⁽³⁾	$T_f - T_a$ (°C)
I-A Prédilution	0	-10.20	-10.80	+0.60
	10	-10.10	-10.90	+0.80
	20	-10.10	-11.10	+1.00
	30	-10.20	-10.90	+0.70
	40	-10.10	-10.70	+0.60
	50	-10.10	-10.80	+0.70
	52	-10.00	-10.60	+0.60
	54	-9.70	-10.80	+1.10
	56	-10.20	-11.30	+1.10
I-A Bruine Verglaçante	0	-10.00	-10.50	+0.50
	10	-10.00	-10.50	+0.50
	20	-10.10	-10.90	+0.80
	30	-10.30	-11.00	+0.70
	40	-10.30	-11.10	+0.80
	45	-10.30	-11.70	+1.40
	50	-9.40	-10.90	+1.50
	54	-10.10	-11.50	+1.40
	60	-10.00	-11.70	+1.70
I-A Neige	0	-10.20	-11.00	+0.80
	10	-11.10	-10.40	-0.70
	20	-10.80	-10.20	-0.60
	30	-10.90	-9.70	-1.20
	40	-11.10	-10.10	-1.00
	50	-11.10	-10.10	-1.00
	54	-11.10	-10.00	-1.10
	56	-10.40	-9.80	-0.60
	60	-11.40	-10.70	-0.70
	65	-11.10	-10.10	-1.00
	68	-10.40	-9.40	-1.00

(1) D : Pourcentage de dilution aqueuse.

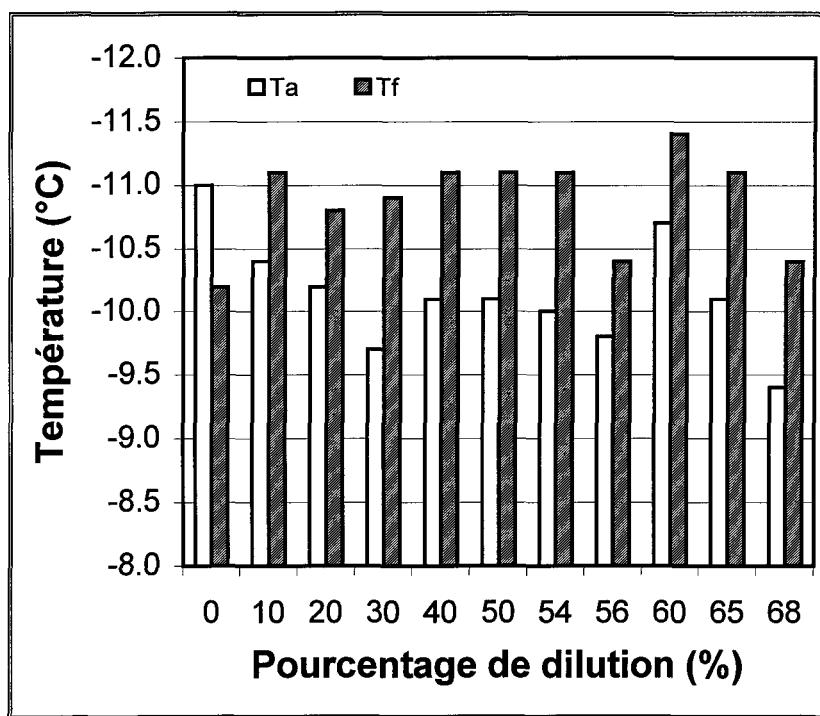
(2) T_f : Température du fluide à 30 s au cours de l'essai d'élimination.

(3) T_a : Température de l'air à 30 s au cours de l'essai d'élimination.

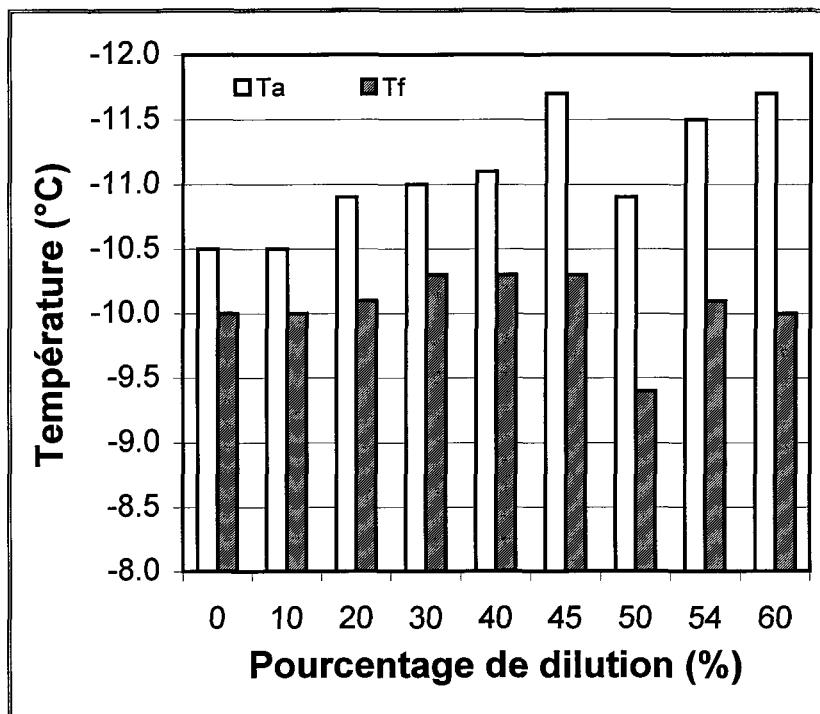
par la neige. Dans le cas de la prédilution et de la contamination par les gouttelettes surfondues, la température du fluide est de 1 °C plus élevée que la température de l'air. Tandis que dans le cas de la neige, le fluide est en moyenne de 1 °C plus froid que l'air au-dessus.

Dans ce dernier cas, il y a dissolution des particules de glace, ce qui abaisse la température du fluide de 1 °C plus bas que celle de l'air. Dans le cas de la prédilution et de la bruine verglaçante, la température du fluide est augmentée de +1 °C environ par rapport à celle de l'air. L'augmentation de température pourrait être explicable par la chaleur latente de fusion lorsque le fluide congèle partiellement.

Cette différence dans la température est illustrée également aux histogrammes des Figures 4.3a et b, montrant les valeurs de températures mesurées lors des essais avec le fluide I-A contaminé par la neige (Figure 4.3a) et par la bruine verglaçante (Figure 4.3b). La diminution de température observée entre T_f et T_a dans le cas de la neige provient de la chaleur prise pour faire dissoudre les particules de glace, tandis que l'augmentation notée avec la bruine provient de la chaleur latente libérée lors de la congélation des gouttelettes surfondues.



a) Neige



b) Bruine verglaçante

Figure 4.2 Température de congélation en fonction du pourcentage

CHAPITRE 5

5. Conclusion

Au cours de ce travail de recherche, nous avons mis au point une procédure d'essai, simple, utilisant une soufflerie de petite dimension, permettant l'évaluation en laboratoire de la performance aérodynamique du fluide résiduel au moment du décollage dans les trois conditions suivantes: non contaminé, contaminé par la bruine verglaçante et contaminé par la neige. À partir des observations et des résultats obtenus dans ces essais aérodynamiques avec quatre produits représentatifs des trois principaux types de fluides dégivrants et antigivre commerciaux utilisés en aéronautique, il est possible de tirer les principales conclusions suivantes:

1. Les quatre produits commerciaux présentent chacun des comportements aérodynamiques qui sont caractéristiques, entre autres facteurs, du type de produit, de son pourcentage de dilution, de la température d'application, et de la nature de la contamination.

2. Les deux fluides dégivrants de type I testés présentent dans les trois conditions de contamination étudiées des comportements très voisins l'un de l'autre. À -10 °C, ils se sont tous montrés acceptables sur le plan aérodynamique, présentant en fonction du pourcentage de dilution des valeurs de l'ECDL comparables à l'erreur expérimentale jusqu'au niveau de dilution de 60 %; en haut de 60 %, de la «névasse» commence à se former en surface du fluide avant ou pendant l'essai; ceci se traduit par une brusque augmentation de l'ECDL dont les valeurs sont à la limite supérieure ou excèdent l'acceptabilité aérodynamique.
3. L'essai aérodynamique à -20 °C des deux fluides de dégivrage fait ressortir l'effet de la diminution de la température sur l'élimination du fluide; à -20 °C, la «névasse» se forme à un pourcentage de dilution plus faible, soit 40 % et 50 % pour l'un et l'autre produit, ce qui se traduit comme dans l'essai à -10 °C par une montée brusque de la valeur de l'EDCL.
4. Les comportements aérodynamiques des deux fluides antigivre de moyenne (type II) et de longue durée (type IV) diffèrent considérablement l'un de l'autre. Le produit antigivre de type II de moyenne durée ne s'est pas montré acceptable sur le plan aérodynamique à -10 et à -20 °C alors que le fluide de type IV s'est révélé acceptable jusqu'à ce que de la «névasse» commence à se former, plus précisément à 70 % de dilution à -10 °C et à 50 % à -20 °C.

5. Par ailleurs, les valeurs de l'EDCL mesurées avec les produits de type II et IV sont généralement plus élevées dans les cas de la dilution dynamique, en particulier dans celui de la neige, que dans le cas de la prédilution. Comme avec les produits dégivrants, lorsqu'il y a de la «névasse» en surface du fluide ou que cette dernière commence à se former, on note alors une brusque remontée dans la valeur de l'EDCL. À une température plus basse, la «névasse» commence à se former à un pourcentage de dilution plus faible.
6. La brusque augmentation de l'EDCL observée dans l'essai d'élimination avec les deux fluides dégivrants et les deux produits antigivre est explicable par la formation de «névasse», constituée d'un mélange non adhérent de glace et de fluide flottant au-dessus du film du fluide. Formée dans la couche supérieure du fluide par congélation du fluide dilué ou par les particules de neige non dissoutes, ce mélange hétérogène qu'est la «névasse» produit une rugosité superficielle qui augmente l'épaisseur de la couche limite au-dessus du fluide.
7. Dans le cas des produits exposés aux gouttelettes surfondues et aux particules de neige, les temps de diffusion des gouttelettes surfondues et de dissolution des particules de neige sont relativement courts, étant limités à la période de temps allant du début de l'exposition à la précipitation au démarrage de l'essai. Le fluide devient non homogène, étant plus dilué en surface qu'en profondeur, favorisant

alors le développement de «névasse» en surface à un niveau de dilution plus faible qu'avec un fluide homogène.

8. Sur la base de ces résultats, l'acceptabilité aérodynamique du fluide ne serait pas bien évaluée dans les tests standards effectués avec seulement les fluides prédilués, en particulier, pour les fluides antigivre offrant une protection de moyenne et longue durées. Si le fluide résiduel prédilué au moment de l'envol est parfaitement homogène, le fluide dilué dynamiquement i.e. contaminé par les précipitations glacées, est hétérogène, ce qui affecte son comportement aérodynamique en raison de la plus grande rugosité de surface qui s'y développe. Cependant, les directives de sécurité aérienne ne permettent pas aux avions de décoller lorsque de la «névasse» est visible sur l'avion. Les tests ont montré que lorsque le niveau de l'EDCL devenait très élevé, la «névasse» était nettement visible avant le départ de l'essai d'élimination.

Bibliographie

AMS 1424A et AMS 1428B, (1996). "Standard Test Method for Aerodynamic Acceptance of Aircraft Ground Deicing/Anti-icing Fluids". Aerospace Material Specification De/Anti-icing Fluid Aircraft, AMS 1424A Newtonian SAE Type I and AMS 1428B Non Newtonian Pseudo-plastic SAE Type II, Type IV, October 1996.

Association of European Airlines (AEA) De-Icing/Anti-Icing Task Force, (1990). "Recommendations for De-Icing/Anti-Icing of Aircraft on Ground". 16th Edition, October 1996, Association of European Airlines, 43p.

Carbonaro, M., (1986). "Experimental Study of the Aerodynamic Characteristics of a Two-Dimensional Wing Model Covered with De/Anti-Icing Fluid during a Simulated Take-Off at Subfreezing Temperatures". VKI Contract report 1986-22, August 1986.

Carbonaro, M., (1987). "Further Study of the Aerodynamic Performance of a Two-Dimensional Wing Model Covered with Simulated Frost or With De/Anti-Icing Fluid during a Wind Tunnel-Simulated Take-Off at Subfreezing Temperatures". VKI Contract report 1987-29, July 1987.

Carbonaro, M., Locatelli, C., Mantegazza, C., McSpadden, C., Moller, I., (1985). "Experimental Study of the Flow of a Film of Aircraft De-Icing Fluid during a Simulated Take-Off at Subfreezing Temperature". VKI Contract Report 1985-02, May 1985.

Cousteix, J., (1988). "Couche limite laminaire". Volume 1, Édition Cépaduès, Toulouse, 407p.

Cousteix, J., (1989). "Turbulence et couche limite". Volume 2, Édition Cépaduès, Toulouse, Septembre, 627p.

De Sy, A., Vidts, J., (1968). "Métallurgie structurale". Éditée par Dunod, Paris, p503.

Ellis, N.D., Nettleton, T.R. and Eggleston, B., (1991). BOEING CANADA 1991 "Effects of Anti-Icing/De-Icing Fluids on Take-off Performance of Commuter Aircraft". Report DHC-TDC-90-1 Transport Canada De Havilland March 91, 101 p.

Hill, E.G., Zierten, T.A., (1990). "Flight and Wind Tunnel Tests of the Aerodynamic Effects of Aircraft Ground De/Anti-icing Fluids". AIAA 29th Aerospace Sciences Meeting, Reno.

Laforte, J.L., Bouchard, G. and Louchez, P.R., (1992). "Aerodynamic Acceptance Testing of Aircraft Ground De/Anti-Icing Fluids". Transportation Development Center Policy and Coordination Group, Transport Canada, Report TP11170E, February 1992, 19p.

Perron, E., (1993). "Modélisation du développement de la couche limite sur un film fluide". Mémoire de Maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, pp.206.

Rasmussen, R., Coté, J., Knight, K., Moose, R.K. and Kuperman, M., (1995) Preprints of 6th Conference on Aviation Weather Systems, Dallas, Texas, January 1995.

Runyan, L.J., Zierten, T.A., Hill, E.G., (1989). "Flight and Wind Tunnel Investigation of Aerodynamic Effects of Aircraft Ground De-Icing/Anti-Icing Fluids" (paper no 24). AGARD Conference proceedings 470, Flight in adverse environmental conditions, Gol, Norway, May 1989.

Wang, X., Bernardin, S., Laforte, J.L., (1995). "Aircraft Flow-Off Performance of De/Anti-icing Fluid during Take-Off under Cold Precipitation". International Icing Symposium '95, Montréal, Canada, 10p.

Zouzou, A., (1996). "Modélisation de la congélation d'un film fluide soumis à une précipitation surfondue". Mémoire de Maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, 106p.

Annexe A Paramètres des essais d'élimination : essai avec «névasse» artificielle

Tableau A.1 Identification des échantillons soumis aux essais

Libellé	Code du LIMA	Condition	Nature
I-A	A653	Dilution 55/45	Type I
I-B	B009	Dilution 50/50	Type I
II-C	A838	Tel que reçu	Type II
II-C 50/50	A838	Dilution 50/50	Type II
IV-D	A922	Tel que reçu	Type IV
MIL	MIL015	Tel que reçu	Type I

Tableau A.2 Effet de la masse de «névasse» appliquée (échantillons II-C, II-C 50/50, IV-D)

Fluide	M ⁽¹⁾ (g)	Libellé	T _f ⁽²⁾ (C°)	Rh ⁽³⁾ (%)	V ⁽⁴⁾ (m/s)	δ ⁽⁵⁾ (mm)	Commentaire
II-C	0	A10P100	-9,6	60,9	65,1	7,63	Tel que reçu
	12	A10P005	-9,1	62,5	64,9	9,16	
	14	A10P008	-9,3	63,3	64,9	10,96	
	16	A10P007	-9,1	63,0	65,1	10,28	
	17	A10P009	-9,3	61,6	64,7	9,02	
	22	A10P004	-9,0	62,6	65,0	9,46	
	28	A10P006	-9,2	60,7	64,8	8,44	Application de «névasse» en un endroit
	30	A10P003	-9,0	64,3	65,0	11,67	
	58	A10P001	-9,1	63,7	65,1	10,50	«Névasse» giclée sur le couvercle
	58	A10P002	-9,2	61,5	65,1	8,78	«Névasse» giclée sur le couvercle
II-C 50/50	0	B10P100	-8,7	76,8	67,6	2,65	Tel que reçu
	17,1	B10P001	-10,2	57,3	65,1	2,82	
	58	B10P003	-9,9	59,6	65,1	6,42	Longue attente avant le test
	76	B10P002	-9,8	59,2	65,1	5,76	
	181	B10P004	-9,7	58,5	65,1	4,75	
IV-D	0	C10P00a	-10,2	60,1	65,5	6,70	
	18	C10P001	-9,3	63,1	65,1	10,38	
sans fluide	14	SLUSH1	-9,3	60,1	64,8	6,43	
	17	SLUSH4	-9,4	63,3	64,8	10,82	
	39	SLUSH2	-9,3	61,1	64,9	8,13	
	53	SLUSH3	-9,2	66,7	64,6	15,30	

Le libellé est indicatif de conditions et du fluide utilisé. Par exemple, A10P005 signifie qu'il s'agit du fluide II-C; 10, que la température est de -10 °C; P, que la contamination est de la «névasse» appliquée; 5, le numéro de l'essai correspondant à l'ordre chronologique.

(1) M : Masse de «névasse» appliquée.

(2) T_f : Température du fluide.

(3) Rh : Pourcentage d'humidité relative.

(4) V : Vitesse du vent atteinte à 30 secondes au cours de l'essai d'élimination.

(5) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

Tableau A.3 Effet de la masse de «névasse» appliquée (échantillon I-A)

Fluide	M⁽¹⁾ (g)	Libellé⁽²⁾	T_f⁽³⁾ (C°)	Rh⁽⁴⁾ (%)	V⁽⁵⁾ (m/s)	δ*⁽⁶⁾ (mm)	Commentaire
I-A	0	D10P00a	-9,5	57,6	65,1	3,48	
	0	D10P00b	-9,6	57,4	65,1	3,67	
	42,4	D10P00k	-9,3	60,5	65,3	7,65	Projetée en 10 fois(cuillère)
	45,3	D10P00j	9,6	61,3	65,1	7,57	Projetée en 10 fois(cuillère)
	47,5	D10P00m	-9,3	58,2	65,1	3,72	projetée en 5 fois(cuillère)
	48,3	D10P00n	-9,3	58,2	65,0	3,81	projetée en 5 fois(cuillère)
	49,3	D10P00l	-9,2	58,7	64,8	5,54	projetée en 5 fois(cuillère)
	72,7	D10P00h	-10,2	60,5	65,2	6,26	projetée en 15 fois(cuillère)
	97,3	D10P00i	-9,7	60,6	65,1	7,59	projetée en 15 fois(cuillère)
	98,5	D10P00d	-10,2	60,6	65,2	6,52	projetée en 18 fois(cuillère)
	103,8	D10P00e	-10,5	61,4	65,2	7,45	projetée en 20 fois(cuillère)
	104,3	D10P00f	-10,1	60,9	64,9	7,48	projetée en 20 fois(cuillère)
	112,8	D10P00g	-9,6	59,0	65,3	4,58	projetée en 18 fois(cuillère)

(1) M : Masse de «névasse» appliquée.

(2) a, b, k...g : la lettre correspond à l'ordre chronologique suivi dans la séquence d'essai.

(3) T_f : Température du fluide.

(4) Rh : Pourcentage d'humidité relative.

(5) V : Vitesse du vent atteinte à 30 secondes au cours de l'essai d'élimination.

(6) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

Annexe B Paramètres des essais d'élimination : effets de différents facteurs

Tableau B.1 Signification des symboles

Symbole	Signification
L	liquide
S	névasse
n	neige
b	beaucoup
p	peu

Photo B Photographies montrant l'état du fluide



Photo B.1 État liquide homogène : L

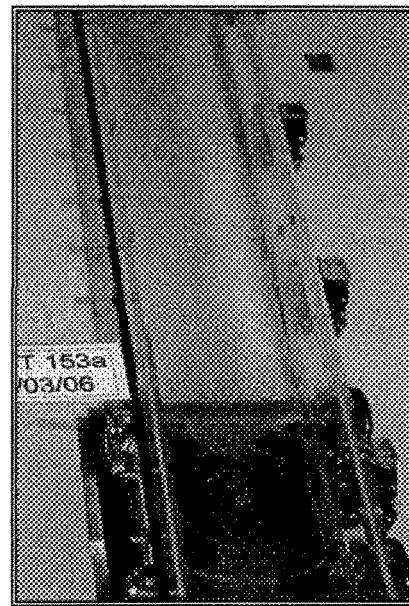


Photo B.2 Mélange de liquide et de «névasse» moyenne : L+S(m)

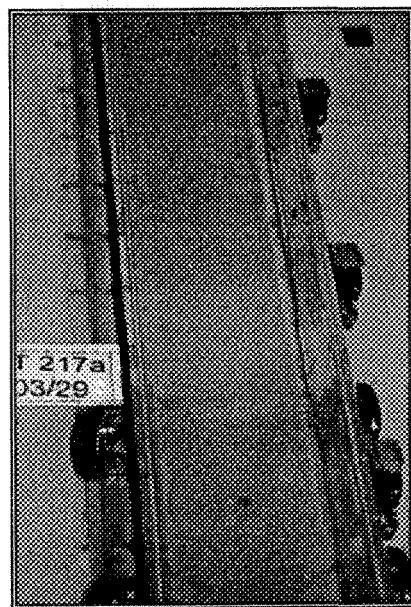


Photo B.3 Mélange de liquide et de beaucoup de «névasse» : L+S(b)

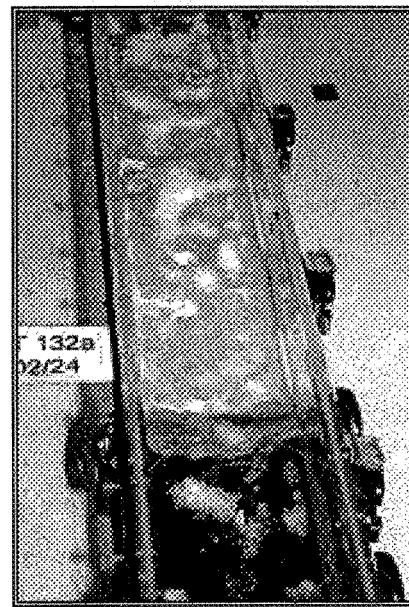


Photo B.4 Mélange de liquide, de faible «névasse» et de beaucoup de neige : L+S(p)+n(b)

Photo B Photographies montrant l'état du fluide

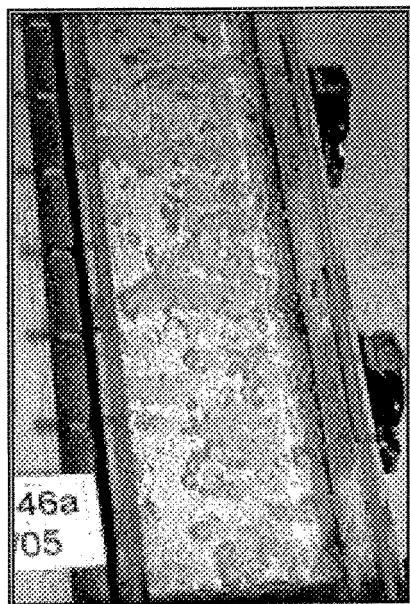


Photo B.5 Faible «névasse» : S(p) *

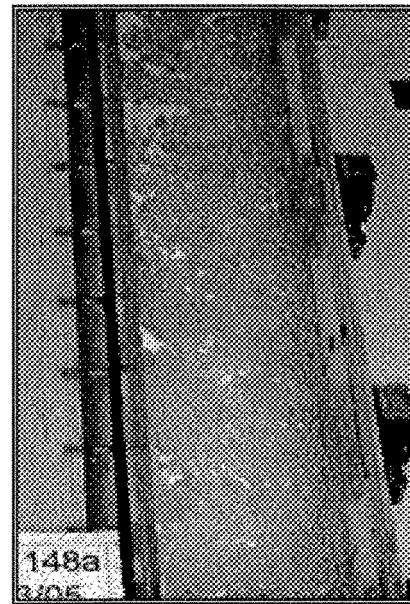


Photo B.6 «névasse» moyenne : S(m)



Photo B.7 Beaucoup de «névasse» : S(b)

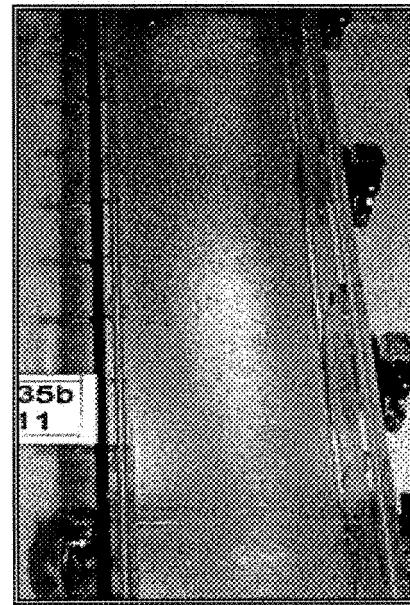


Photo B.8 Mélange d'un peu de neige et de beaucoup de «névasse» : n(p)+S(b)

* le plan correspond au fond du tunnel

Tableau B.2 Effet du temps d'attente après application de la neige : échantillon II-C

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh (%)	ε(0) ⁽⁵⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁶⁾ (μm)	E ⁽⁷⁾ (%)	τ ⁽⁸⁾	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	P2 ⁽¹¹⁾	δ* ⁽¹²⁾ (mm)
DRYC003		-10,3	-10,5	57,5								3,15
MILC003	0	-10,1	-9,9	61,1	1397	115	92		L ⁽¹³⁾		L	7,79
A10N40I	40	-9,9	-10,5	63,9	1863	203	89	2	LS(b)n(p) ⁽¹⁴⁾	LS(b)n(p)	L+S(p) ⁽¹⁵⁾	11,99
A10N40m	40	-9,9	-10,6	64,2	1736	220	87	2	LS(b)n(p)	LS(b)n(p)	L+S(p)	12,08
A10N40n	40	-9,8	-10,8	63,9	1736	195	89	5	LS(b)n(p)	LS(b)n(p)	L+S(p)	11,39
A10N40o	40	-9,9	-10,9	63,6	1736	212	88	5	LS(b)n(p)	LS(b)n(p)	L+S(p)	11,36
A10N40f	40	-10,2	-10,8	62,8	1778	169	90	9	LS(b)n(p)	LS(b)n(p)	L+S(p)	9,73
A10N40g	40	-10,1	-10,8	62,1	1778	228	87	9	LS(b)n(p)	LS(b)n(p)	L+S(p)	9,27
A10N40h	40	-9,7	-10,7	63,2	1651	169	90	9	LS(b)n(p)	LS(b)n(p)	L+S(p)	10,17
A10N40i	40	-9,9	-10,5	63,3	1778	195	89	9	LS(b)n(p)	LS(b)n(p)	L+S(p)	9,91
A10N40j	40	-9,3	-10,5	62,4	1693	203	89	14,4	LS(b)n(p)	LS(b)n(p)	L+S(p)	9,84
A10N40k	40	-9,1	-10,1	62,1	1736	186	89	14,4	LS(b)n(p)	LS(b)n(p)	L+S(p)	8,98
MILC001	0	-10,1	-9,7	61,4	1439	135	91		L	L	L	7,83
DRYC001		-9,9	-9,8	57,8								3,13

(1) Fluide tel que reçu contaminé par la neige appliquée en une fois et après un temps d'attente, τ , incluant le temps d'application. La durée de l'application T : 2,5 min pour 40 % de Dilution.

(2) D : Pourcentage de dilution en neige.

(3) T_a et (4) T_f : Températures de l'air et du fluide.

(5) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application de la neige.

(6) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(7) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(8) τ : Temps d'attente incluant le temps pour appliquer la neige.

(9) P0 : État du fluide au cours de l'application de la neige.

(10) P1 : État du fluide après l'application de la neige.

(11) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(12) Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(13) L : Liquide homogène.

(14) L+S(b)+n(p) : Liquide+beaucoup de «névasse»+un peu de neige.

(15) L+S(p) : Liquide+un peu de «névasse».

Tableau B.3 Effet d'une application unique de neige : échantillon II-C

Libellé ⁽¹⁾	D %.	T _a °C	T _f °C	Rh (%)	ε(0) ⁽²⁾ (μm)	ε(f) ⁽³⁾ (μm)	E ⁽⁴⁾ %	P0 ⁽⁵⁾	P1 ⁽⁶⁾	P2 ⁽⁷⁾	δ* ⁽⁸⁾ mm
DRY10Na		-10,5	-10,7	77,4							3,11
MI10N00a	0	-10,3	-10,2	77,5	1397	127	91	L ⁽⁹⁾		L	8,03
A10N00a	0	-10,5	-10,4	76,0	1524	187	88	L		L	8,10
A10N00b	0	-10,3	-10,1	75,5	1482	187	87	L		L	8,13
A10N10a	10	-10,2	-10,7	75,5	1566	178	89	L+S(p) ⁽¹⁰⁾	L	L	8,50
A10N10b	10	-10,5	-10,9	77,5	1566	195	88	L+S(p)	L	L	8,31
A10N20a	20	-10,5	-10,8	75,5	1651	178	89	L+S(p)	L+S(p)	L	7,73
A10N20b	20	-10,0	-10,5	76,0	1651	195	88	L+S(p)	L+S(p)	L	8,04
A10N30a	30	-9,9	-10,8	76,5	1693	169	90	L+S(p)	L+S(p)	L	8,35
A10N30b	30	-9,7	-10,9	76,5	1524	169	89	L+S(p)	L+S(p)	L	8,15
A10N40a	40	-9,7	-10,7	76,0	1778	178	90	LS(b)n(p) ⁽¹¹⁾	LS(b)n(p)	L+S(p)	9,58
A10N40b	40	-9,6	-10,7	75,5	1905	169	91	LS(b)n(p)	LS(b)n(p)	L+S(p)	8,90
A10N40c	40	-10,0	-11,0	61,1	1736	169	90	LS(b)n(p)	LS(b)n(p)	L+S(p)	8,25
A10N40d	40	-10,4	-11,1	62,3	1778	186	90	LS(b)n(p)	LS(b)n(p)	L+S(p)	10,19
A10N40e	40	-10,6	-11,2	62,4	1863	110	94	LS(b)n(p)	LS(b)n(p)	L+S(p)	9,88
A10N50a	50	-10,2	-10,7	75,5	1934	178	91	S+n ⁽¹²⁾	S+n	L+S(p)	12,20
A10N50b	50	-10,2	-11,0	76,5	1693	186	89	S+n	S+n	L+S(p)	9,27
A10N50c	50	-10,7	-11,5	62,8	1693	212	88	S+n	S+n	L+S(p)	10,48
M10N00b	0	-10,1	-10,0	76,5	1524	118	92	L		L	7,56
DRY10Nb		-10,3	-10,6	76,5							3,05

(1) Fluide contaminé par la neige appliquée en une seule fois, avec 5 min. d'attente. La durée de l'application T : 1 min pour 10 % de Dilution et 2,5 min pour 50 % de Dilution.

(2) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application de la neige.

(3) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(4) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(5) P0 : État du fluide au cours d'application de la neige.

(6) P1 : État du fluide après l'application de la neige.

(7) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(8) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(9) L : Liquide homogène.

(10) L+S(p) : Liquide+un peu de «névasse».

(11) L+S(b)+n(p) : Liquide+beaucoup de «névasse»+un peu de neige.

(12) S+n : «Névasse»+neige.

Tableau B.4 Effet de la densité de la neige appliquée : échantillon II-C

A : neige de 0.056 g/cm³

Libellé ⁽¹⁾	D (%)	T _a (°C)	T _f (°C)	Rh (%)	ε(0) ⁽²⁾ (μm)	ε(f) ⁽³⁾ (μm)	E (%)	τ ⁽⁴⁾	P0 ⁽⁵⁾	P1 ⁽⁶⁾	P2 ⁽⁷⁾	δ* ⁽⁸⁾ (mm)
DRYC016		-11,4	-11,5	57,4								3,07
MILC016	0	-11,2	-11,1	61,6	1524	140	91		L ⁽⁹⁾		L	7,97
A10N00e	0	-9,5	-9,9	61,5	1524	178	88		L		L	8,19
A10N00f	0	-10,0	-9,8	61,4	1524	166	89		L		L	8,25
A10N20e	20	-10,5	-11,1	61,9	1609	212	87	7,2	LS(m)n(m) ⁽¹⁰⁾	LS(p) ⁽¹¹⁾	L	8,41
A10N20f	20	-9,9	-10,7	61,4	1524	212	86	7,2	LS(m)n(m)	LS(p)	I	8,26
MILC017	0	-9,5	-9,8	61,2	1524	140	91		L		L	7,79
DRYC017		-9,6	-9,5	57,7								3,12

B : neige de 0,075 g/cm³

Libellé	D (%)	T _a (°C)	T _f (°C)	Rh (%)	ε(0)	ε(f)	E (%)	τ	P0	P1	P2	δ* (mm)
DRYC018		-9,9	-10,2	58,1								3,30
MILC018	0	-10,1	-9,9	61,6	1461	114	92		L		L	8,53
A10N00g	0	-10,0	-9,5	61,9	1524	191	87		L		L	8,62
A10N00h	0	-10,1	-9,6	61,7	1524	203	87		L		L	9,02
A10N00i	0	-10,7	-10,8	61,7	1524	178	88		L		L	8,98
A10N40p	40	-10,6	-11,4	62,3	1524	220	86	14,4	LS(p)n(b)	LS(b)n(p)	L	10,02
A10N40q	40	-9,7	-10,8	62,3	1524	203	87	14,4	LS(p)n(b)	LS(b)n(p)	L	9,18
MILC019	0	-10,8	-10,5	61,5	1461	114	92		L		L	8,88
DRYC019		-9,1	-9,4	58,6								3,34

(1) Fluide tel que reçu contaminé par la neige légère.

(2) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après application de neige .

(3) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(4) τ : Temps d'attente inclus le temps pour appliquer la neige.

(5) P0 : État du fluide avant l'application de la neige.

(6) P1 : État du fluide après l'application de la neige.

(7) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(8) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(9) L : Film fluide homogène.

(10) L+S(m)+n(m) : Liquide+«nèvasse» moyenne+neige moyenne.

(11) L+S(p) : Liquide+un peu de «nèvasse».

Tableau B.5 Effet de l'épaisseur du fluide (tel que reçu et prédilué)

A : échantillon II-C (tel que reçu)

Libellé ⁽¹⁾	D (%)	T _f (°C)	$\varepsilon(0)^{(2)}$ (μm)	$\varepsilon(f)^{(3)}$ (μm)	E ⁽⁴⁾ (%)	P0 ⁽⁵⁾	P2 ⁽⁶⁾	δ^* (mm)
A10S00a	0	-10,0	1500	153	89,8	L ⁽⁷⁾	L	8,01
A10S00b	0	-10,1	1500	165	89,0	L	L	7,83
A10S00c	0	-10,2	2000	153	92,4	L	L	8,36
A10S00d	0	-10,1	2000	178	91,1	L	L	8,31
A10S00e	0	-10,0	2500	165	93,4	L	L	8,57
A10S00f	0	-10,0	2500	165	93,4	L	L	8,46
A10S00g	0	-10,0	3000	178	94,1	L	L	8,60
A10S00h	0	-10,0	3000	178	94,1	L	L	8,57

B : échantillon II-C 50/50

Libellé	D (%)	T _f (°C)	$\varepsilon(0)$ (μm)	$\varepsilon(f)$ (μm)	E (%)	P0	P2	δ^* (mm)
B10S00a	50	-10,3	1500	191	87,3	L ⁽⁷⁾	L	5,17
B10S00b	50	-10,2	1500	191	87,3	L	L	5,18
B10S00c	50	-9,9	2000	178	91,1	L	L	5,41
B10S00d	50	-10,0	2000	165	91,8	L	L	5,29
B10S00e	50	-10,0	2500	178	92,9	L	L	5,46
B10S00f	50	-10,0	2500	178	92,9	L	L	5,27
B10S00g	50	-9,9	3000	178	94,1	L	L	5,18
B10S00h	50	-10,0	3000	191	93,6	L	L	5,26

(1) Application du fluide tel que reçu.

(2) $\varepsilon(0)$: Épaisseur du fluide mesurée après l'application de la neige.(3) $\varepsilon(f)$: Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(4) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(5) P0 : État du fluide avant le test.

(6) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(7) L : Liquide homogène.

Tableau B.6 Effet de l'épaisseur du fluide (cas de la bruine)

A :échantillon II-C dilué par la bruine

Libellé ⁽¹⁾	D (%)	T _f (°C)	ε(0) ⁽²⁾ (μm)	ε(f) ⁽³⁾ (μm)	E ⁽⁴⁾ (%)	P0 ⁽⁵⁾	P1 ⁽⁶⁾	P2 ⁽⁷⁾	δ* (mm)
A10B50c	50	-10,4	1736	203	88,3	L ⁽⁸⁾	S(b) ⁽⁹⁾	L	7,88
A10B50d	50	-10,0	1651	187	88,7	L	S(b)	L	7,76
A10B50e	50	-10,1	2032	195	90,4	L	S(b)	L	8,58
A10B50f	50	-10,1	2032	186	90,8	L	S(b)	L	8,18
A10B50g	50	-10,0	2032	187	90,8	L	S(b)	L	8,42
A10B50h	50	-10,6	2032	187	90,8	L	S(b)	L	8,97
A10B50i	50	-10,4	3000	203	93,2	L	S(b)	L	8,63
A10B50j	50	-10,4	3000	195	93,5	L	S(b)	L	10,40

(1) Application du fluide tel que reçu contaminé par la bruine pendant 18,8 min. équivalant à une dilution de 50/50.

(2) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après application de la bruine.

(3) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(4) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(5) P0 : État du fluide avant précipitations de la bruine.

(6) P1 : État du fluide après précipitations de la bruine.

(7) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(8) L : Liquide homogène.

(9) S(b) : Beaucoup de «névasse».

Tableau B.7 Essai sans fluide appliqué

A : dépôt de glace de bruine verglaçante

Libellé ⁽¹⁾	T _f (°C)	ε(0)* (μm)	P0	P2	δ*
DRYC036	-9,6				2,84
DRYC037	-10,3				2,94
GLACE1	-9,0	1553	G	g	5,68
GLACE2	-8,3	1514	G	g	5,43

ε(0)* : épaisseur de la glace déposée sur la plaque plane.

(la glace après une exposition de 37,5 min. de bruine verglaçante, on obtient 1,5 mm d'épaisseur).

b : dépôt de neige

Libellé ⁽¹⁾	T _f (°C)	ε(0) ⁽²⁾ (μm)	P0 ⁽³⁾	P2 ⁽⁴⁾	δ*
DRYC034	-9,5				2,91
DRYC035	-10,2				2,91
NEIGE1	-10,5	1500	n(b) ⁽⁵⁾	n(p) ⁽⁶⁾	5,57
NEIGE2	-10,6	1500	n(b)	n(p)	3,35
NEIGE3	-10,4	1500	n(b)	n(p)	3,15

(1) 31,3 g de neige de 0,3 g/cm³ appliquée.

(2) Épaisseur de la neige déposée sur la plaque plane.

(31,3 g de neige équivalent à 1,5 mm d'épaisseur).

(3) P0 : État du fluide après l'application de la neige.

(4) P1 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(5) n(b) : Beaucoup de «névasse».

(6) n(p) : Un peu de «névasse».

Tableau B.8 Étalonnage à sec et avec le fluide référence

Libellé	T _a (°C)	T _f (°C)	Rh (%)	ε(0) ⁽¹⁾ (μm)	ε(f) ⁽²⁾ (μm)	E ⁽³⁾ (%)	V ⁽⁴⁾	δ* (mm)
DRYA089	-3,2	-3,4	74,4				64,9	2,90
DRYA090	-2,4	-3,2	77,0				64,9	2,88
DRYA091	-1,1	-0,6	76,4				65,0	2,92
DRYC092	-10,1	-10,2	68,5				64,8	2,85
DRYC093	-10,2	-10,1	69,5				65,0	2,84
DRYC094	-9,9	-9,2	67,5				65,2	2,87
DRYE095	-21,2	-19,8	57,8				65,0	2,78
DRYE096	-21,0	-20,1	58,5				65,0	2,81
DRYE097	-20,6	-19,9	59,5				65,0	2,86
DRYF098	-25,1	-25,5	58,5				65,0	2,81
DRYF099	-25,1	-25,2	59,6				65,0	2,80
DRYF100	-24,9	-24,2	59,5				65,0	2,91
MILA073	-1,5	-2,1	78,4	1397	68	95,2	65,3	5,34
MILA074	-1,2	-1,4	78,4	1482	76	94,9	65,1	5,07
MILA075	-1,0	-1,0	78,4	1439	85	94,1	65,2	5,27
MILC076	-9,8	-9,7	70,4	1566	93	94,0	65,1	7,04
MILC077	-10,0	-9,5	68,4	1482	93	93,7	65,1	7,09
MILC078	-9,7	-9,3	68,5	1439	101	93,0	65,0	7,08
MILE079	-20,5	-20,1	59,5	1482	211	85,7	64,6	10,42
MILE080	-20,9	-20,2	58,5	1482	203	86,3	64,8	10,72
MILE081	-20,7	-20,4	59,5	1482	203	86,3	64,5	10,69
MILF082	-25,3	-25,2	58,5	1482	338	77,2	64,4	12,11
MILF083	-24,9	-24,7	61,5	1482	279	81,1	64,5	12,18
MILF084	-24,8	-24,5	59,5	1439	262	81,8	64,5	11,53

(1) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application.

(2) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(3) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(4) V : Vitesse du vent atteinte à 30 secondes.

Annexe C Paramètres des essais d'élimination : échantillon I-A

Tableau C.1 Effet de la dilution homogène (échantillon I-A à -10 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (μm)	E ⁽⁸⁾ (%)	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	δ* ⁽¹¹⁾ (mm)
MILC008	0	-10,0	-9,7	61,1	1397	115	92	L ⁽¹²⁾	L	8,00
D10E00a	0	-10,8	-10,2	58,9	1651	64	96	L	L	4,53
D10E00b	0	-10,8	-10,1	59,0	1524	38	98	L	L	4,63
D10E10a	10	-10,9	-10,1	58,8	1524	38	98	L	L	4,29
D10E10b	10	-11,0	-10,2	58,9	1461	38	97	L	L	4,45
D10E20a	20	-11,1	-10,1	58,3	1524	25	98	L	L	4,31
D10E20b	20	-11,1	-10,1	58,7	1588	25	98	L	L	4,32
D10E30a	30	-10,9	-10,2	58,4	1524	13	99	L	L	4,19
D10E30b	30	-11,0	-10,1	58,2	1588	13	99	L	L	4,16
D10E40a	40	-10,7	-10,1	58,2	1524	13	99	L	L	4,01
D10E40b	40	-11,2	-10,3	58,3	1588	13	99	L	L	4,02
D10E50a	50	-10,8	-10,1	58,2	1588	13	99	L	L	3,97
D10E50b	50	-11,1	-10,2	58,5	1588	13	99	L	L	3,90
D10E52a	52	-10,6	-10,0	58,3	1461	13	99	L	L	3,77
D10E52b	52	-11,1	-10,3	57,8	1524	13	99	L	L	3,81
D10E54a	54	-10,8	-9,7	58,4	1588	13	99	L	L+S(p) ⁽¹³⁾	3,85
D10E54b	54	-11,0	-9,8	58,4	1524	13	99	L	L+S(p)	3,83
D10E56a	56	-11,3	-10,2	58,8	1270	gèle		L	S(b) ⁽¹⁴⁾	4,97
D10E56b	56	-10,7	-10,0	60,5	1270	gèle		L	S(b)	7,31
DRYC008		-10,0	-9,7	57,8						3,16

(1) Fluide prédilué.

(2) D : Pourcentage de dilution aqueuse.

(3) et (4) : Température de l'air et du fluide.

(5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.

(6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après application.

(7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(9) P0 : État du fluide après l'application.

(10) P1 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(11) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(12) L : Liquide homogène.

(13) L+S(p) : Liquide + un peu de «nèvasse».

(14) S(b) : Beaucoup de «nèvasse».

Tableau C.2 Effet de la dilution homogène (échantillon I-A à -20 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (μm)	E ⁽⁸⁾ (%)	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	δ* ⁽¹¹⁾ (mm)
DRYE065		-21,5	-21,5	74,5						2,87
MILE049	0	-21,1	-21,0	75,5	1397	178	87	L ⁽¹²⁾	L	11,25
D20E00a	0	-20,7	-20,7	75,5	1524	77	95	L	L	4,46
D20E00b	0	-20,6	-20,5	75,5	1524	89	94	L	L	4,39
D20E10a	10	-20,7	-20,5	75,7	1524	89	94	L	L	3,85
D20E10b	10	-21,0	-20,5	75,5	1524	64	96	L	L	4,12
D20E10C	10	-21,0	-20,5	75,5	1524	76	95	L	L	4,13
D20E20a	20	-20,6	-20,5	75,5	1524	38	98	L	L	3,86
D20E20b	20	-20,7	-20,5	75,6	1524	38	98	L	L	3,94
D20E23b	23	-20,7	-20,6	79,3	1524	25	98	L	L	3,44
D20E25a	25	-21,1	-20,6	79,4	1588	38	98	L+S(m) ⁽¹³⁾	L	6,09
D20E25b	25	-20,8	-20,6	79,4	1461	8	99	L+S(m)	L	8,21
D20E25C	25	-20,5	-20,5	79,5	1461	8	99	L+S(m)	L	7,82
D20F23a	23	-21,0	-20,7	79,5	1588	25	98	L	L	3,52
MILE050	0	-21,0	-20,4	75,5	1397	178	87			10,97
DRYE066		-21,0	-20,4	75,6						2,97

(1) Fluide prédilué.

(2) D : Pourcentage de dilution aqueuse.

(3) et (4) T_a et T_f : Températures de l'air et du fluide.

(5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.

(6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application.

(7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(9) P0 : État du fluide après l'application.

(10) P1 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(11) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(12) L : Liquide homogène.

(13) L+S(m) : Liquide+ «névasse» moyenne.

Tableau C.3 Effet de la bruine verglaçante (échantillon I-A à -10 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (μm)	E ⁽⁸⁾ (%)	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	P2 ⁽¹¹⁾	δ* ⁽¹²⁾ (mm)
MILC010	0	-10,0	-9,9	61,1	1397	115	92	L ⁽¹³⁾	L	L	8,28
D10B00a	0	-10,2	-9,9	58,8	1524	34	98	L	L	L	4,44
D10B00b	0	-10,5	-10,0	58,5	1397	42	97	L	L	L	4,45
D10B10a	10	-10,7	-10,6	59,0	1355	42	97	L	L	L	4,79
D10B10b	10	-10,5	-10,0	58,9	1397	42	97	L	L	L	4,74
D10B20a	20	-11,0	-10,3	58,7	1312	34	97	L	L	L	4,64
D10B20b	20	-10,9	-10,1	58,8	1185	34	97	L	L	L	4,65
D10B30a	30	-11,0	-10,3	58,2	1397	25	98	L	L,S(p) ⁽¹⁴⁾	L	4,58
D10B30b	30	-11,0	-10,2	58,4	1185	25	98	L	L,S(p)	L	4,71
D10B40a	40	-11,4	-10,5	58,1	1185	25	98	L	L,S(p)	L	4,14
D10B40b	40	-11,1	-10,3	58,1	1270	25	98	L	L,S(p)	L	4,39
D10B45a	45	-10,8	-9,6	58,6	1228	17	99	L	L,S(p)	L	4,16
D10B45b	45	-11,7	-10,3	59,1	1288	17	99	L	L,S(p)	L	4,85
D10B50a	50	-10,9	-9,6	59,5	1397	17	99	L	L,S(p)	L	5,66
D10B50b	50	-10,9	-9,4	59,6	1270	17	99	L	L,S(p)	L	5,74
D10B54a	54	-10,8	-9,3	58,8	1270	17	99	L	L,S(p)	L	5,03
D10B54b	54	-11,5	-10,1	59,3	1312	17	99	L	L,S(p)	L	5,75
D10B60a	60	-11,7	-10,0	61,4	1524	8	99	L	L,S(b)	S(p)	8,05
D10B60b	60	-11,8	-10,1	63,7	1566	8	99	L	L,S(b)	S(p)	10,7
DRYC010		-10,3	-10,2	58,1							3,27

(1) Fluide tel que reçu contaminé par la bruine.

(2) D : Pourcentage de dilution en bruine verglaçante.

(3) et (4) T_a et T_f : Températures de l'air et du fluide.

(5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.

(6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application.

(7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(9) P0 : État du fluide avant précipitations de la bruine.

(10) P1 : État du fluide après précipitations de la bruine.

(11) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(12) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(13) L : Liquide homogène.

(14) L+S(p) : Liquide+ un peu de «névasse».

Tableau C.4 Effet de la bruine verglaçante (échantillon I-A à -20 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (µm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (µm)	E ⁽⁸⁾ (%)	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	P2 ⁽¹¹⁾	δ* ⁽¹²⁾ (mm)
DRYE083		-20,5	-20,5	72,4							3,09
MILE067	0	-20,4	-20,2	70,5	1397	191	86	L ⁽¹³⁾	L	L	10,58
D20B00a	0	-20,4	-20,2	69,5	1524	136	91	L	L	L	4,06
D20B00b	0	-20,2	-20,3	67,5	1524	76	95	L	L	L	4,00
D20B10a	10	-20,1	-19,8	71,3	1482	144	90	L	L,S(p) ⁽¹⁴⁾	L	4,30
D20B10b	10	-20,4	-19,6	73,4	1524	110	93	L	L,S(p)	L	4,36
D20B20a	20	-20,4	-19,3	73,4	1397	76	95	L	L,S(m) ⁽¹⁵⁾	L	4,27
D20B20b	20	-20,0	-19,3	72,4	1524	76	95	L	L,S(m)	L	4,27
D20B30a	30	-20,0	-18,9	74,4	1693	76	96	L	L,S(b) ⁽¹⁶⁾	L	5,02
D20B30C	30	-19,9	-18,5	74,3	1693	51	97	L	L,S(b)	L	5,38
D20B40a	40	-20,7	-19,8	73,4	2032	68	97	L	S(b) ⁽¹⁷⁾	S(p) ⁽¹⁸⁾	6,33
D20B40b	40	-20,4	-19,1	73,4	1693	59	97	L	S(b)	S(p)	7,48
D20B40C	40	-21,1	-19,6	73,4	1863	85	96	L	S(b)	S(p)	7,07
D20B50a	50	-20,6	-18,9	74,4	2032	93	95	L	S(b)	S(p)	10,88
D20B50b	50	-20,3	-18,0	74,4	2032	85	96	L	S(b)	S(p)	11,34
MILE068	0	-20,2	-19,1	70,4	1524	165	89	L	L	L	10,44
DRYE084		-20,2	-18,7	71,4							3,03

- (1) Fluide tel que reçu contaminé par la bruine.
 (2) D : Pourcentage de dilution en bruine verglaçante.
 (3) et (4) : Température de l'air et du fluide.
 (5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.
 (6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application.
 (7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.
 (8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.
 (9) P0 : État du fluide avant précipitations de la bruine.
 (10) P1 : État du fluide après précipitations de la bruine.
 (11) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.
 (12) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.
 (13) L : Liquide homogène.
 (14) L+S(p) : liquide + un peu «névasse».
 (15) L+S(m) : Liquide + «névasse» moyenne.
 (16) L+S(b) : Liquide + beaucoup de «névasse».
 (17) S(b) : Beaucoup de «névasse».
 (18) S(p) : Un peu de «névasse».

Tableau C.5 Effet de la contamination par la neige (échantillon I-A à -10 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh (%)	ε(0) ⁽⁵⁾ (µm)	ε(f) ⁽⁶⁾ (µm)	E (%)	τ ⁽⁷⁾	P0 ⁽⁸⁾	P1 ⁽⁹⁾	P2 ⁽¹⁰⁾	δ* ⁽¹¹⁾ (mm)
MILC009	0	-11,0	-10,3	61,5	1524	115	92		L ⁽¹²⁾		L	8,24
D10N00a	0	-11,0	-10,2	58,7	1524	34	98		L	L	L	4,36
D10N00b	0	-10,9	-10,2	58,3	1524	42	97		L	L	L	4,30
D10N10a	10	-10,4	-11,1	58,6	1693	42	98	3,6	L	L	L	4,27
D10N10b	10	-10,1	-10,6	58,3	1482	42	97	3,6	L	L	L	4,44
D10N20a	20	-10,2	-10,8	58,7	1609	34	98	7,2	L	L	L	4,46
D10N20b	20	-9,9	-11,0	58,7	1609	34	98	7,2	L	L	L	4,48
D10N30a	30	-9,7	-10,9	58,5	1736	51	97	11	L+S(p) ⁽¹³⁾	L+S(p)	L	4,61
D10N30b	30	-9,6	-10,9	58,5	1524	34	98	11	L+S(p)	L+S(p)	L	4,53
D10N40a	40	-10,1	-11,1	58,4	1778	25	99	14	L+S(m) ⁽¹⁴⁾	L+S(m)	L	4,46
D10N40b	40	-10,0	-11,2	58,9	1651	25	98	14	L+S(m)	L+S(m)	L	4,50
D10N50a	50	-10,1	-11,1	58,8	1905	42	98	18	n(p)+S(b) ⁽¹⁵⁾	S(b) ⁽¹⁸⁾	L	4,76
D10N50b	50	-10,2	-11,2	59,0	2032	42	98	18	n(p)+S(b)	S(b)	L	4,60
D10N54a	54	-10,0	-11,1	59,7	2032	34	98	19	n(p)+S(b)	S(b)	L	5,84
D10N54b	54	-9,8	-10,9	59,0	2032	34	98	19	n(p)+S(b)	S(b)	L	4,93
D10N56a	56	-9,8	-10,4	61,2	2032	25	99	20	n(p)+S(b)	S(b)	L	7,59
D10N60a	60	-10,7	-11,4	60,1	2032	8	100	22	n(m),S(b) ⁽¹⁶⁾	S(b)	L	6,40
D10N60b	60	-10,3	-11,2	60,0	2032	8	100	22	n(m),S(b)	S(b)	L	6,24
D10N65a	65	-10,1	-11,1	61,6	2032	8	100	23	n(m),S(b)	S(b)	L	8,17
D10N65b	65	-9,6	-10,7	60,3	2032	8	100	23	n(m),S(b)	S(b)	L	6,59
D10N68a	68	-9,4	-10,4	59,8	2032	8	100	24	n(p)+S(b) ⁽¹⁷⁾	S(b)	L	6,10
D10N68b	68	-9,4	-10,4	61,8	2032	8	100	24	n(p)+S(b)	S(b)	L	8,95
DRYC009		-10,6	-10,6	57,9								3,21

(1) Fluide tel que reçu contaminé par la bruine.

(2) D : Pourcentage de dilution en bruine verglaçante.

(3) et (4) : Température de l'air et du fluide.

(5) et (6) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application.

(6) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(7) τ : Temps d'attente incluant le temps pour appliquer la neige.

(8) P0 : État du fluide avant précipitations de la bruine.

(9) P1 : État du fluide après précipitations de la bruine.

(10) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(11) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(12) L : Liquide homogène.

(13) L+S(p) : liquide + un peu de «névasse».

(14) L+S(m) : Liquide + «névasse» moyenne.

(15) n(p)+S(b) : Un peu de neige + beaucoup de «névasse».

(16) n(m)+S(b) : Neige moyenne+beaucoup de «névasse».

(17) n(b)+S(b) : Beaucoup de neige+beaucoup de «névasse».

(18) S(b) : Beaucoup de «névasse».

Tableau C.6 Effet de la contamination par la neige (échantillon I-A à -20 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh	ε(0) ⁽⁵⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁶⁾ (μm)	E ⁽⁷⁾ (%)	τ ⁽⁸⁾	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	P2 ⁽¹¹⁾	δ* ⁽¹²⁾ (mm)
DRYE074		-21,4	-21,4	79,5								2,78
MILE058	0	-21,2	-21,1	79,5	1461	204	86		L ⁽¹³⁾	L	L	10,89
D20N00a	0	-20,7	-20,8	79,4	1524	114	93		L	L	L	3,92
D20N00b	0	-20,9	-20,7	79,5	1524	56	96		L	L	L	3,91
D20N10a	10	-20,9	-21,2	79,5	1524	85	94	3,6	L+S(p) ⁽¹⁴⁾	L+S(p)	L	4,95
D20N10b	10	-21,3	-21,3	79,5	1778	51	97	3,6	L+S(p)	L+S(p)	L+S(p) ⁽¹⁹⁾	5,12
D20N20a	20	-21,1	-21,4	79,5	1482	68	95	7,2	L+S(m) ⁽¹⁵⁾	L+S(m)	L+S(p)	6,14
D20N20b	20	-20,9	-21,4	80,4	1609	85	95	7,2	L+S(m)	L+S(m)	L+S(p)	5,98
D20N30a	30	-20,5	-21,1	80,5	1820	93	95	10,8	L+S(b) ⁽¹⁶⁾	L+S(b)	L+S(p)	6,77
D20N30b	30	-20,6	-21,1	80,2	1736	76	96	10,8	L+S(b)	L+S(b)	L+S(p)	7,32
D20N40a	40	-20,2	-20,9	79,5	2400	51	98	14,4	n(p)+S(b) ⁽¹⁷⁾	S(b) ⁽¹⁸⁾	L+S(p)	8,12
D20N40b	40	-20,5	-20,9	79,5	2400	34	99	14,4	n(p)+S(b)	S(b)	L+S(p)	8,47
D20N50a	50	-20,7	-20,5	89,4	2477	25	99	18	n(p)+S(b)	S(b)	L+S(p)	15,05
D20N50b	50	-20,5	-20,8	85,4	2467	25	99	18	n(p)+S(b)	S(b)	L+S(p)	15,80
MILE059	0	-20,3	-20,4	84,4	1397	204	85		L	L	L	10,86
DRYE075		-20,5	-20,5	84,5	0	0	0					2,93

(1) Fluide tel que reçu contaminé par la neige. La densité de la neige : d = 0,3 g/cm³

(2) D : Pourcentage de dilution en neige.

(3) T_a et (4) T_f : Températures de l'air et du fluide.

(5) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application de la neige.

(6) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(7) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(8) τ : Temps d'attente incluant le temps pour appliquer la neige.

(9) P0 : État du fluide au cours de l'application de la neige.

(10) P1 : État du fluide après l'application de la neige.

(11) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(12) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(13) L : Liquide homogène.

(14) L+S(p) : liquide + un peu de «névasse».

(15) L+S(m) : Liquide + «névasse» moyenne.

(16) n(p)+S(b) : Un peu de neige + beaucoup de «névasse».

(17) n(m)+S(b) : Neige moyenne+beaucoup de «névasse».

(18) n(b)+S(b) : Beaucoup de neige+beaucoup de «névasse».

(19) S(b) : Beaucoup de «névasse».

Annexe D Paramètres des essais d'élimination : échantillon I-B

Tableau D.1 Effet de la dilution homogène (échantillon I-B à -10 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (μm)	E ⁽⁸⁾ (%)	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	δ* ⁽¹¹⁾ (mm)
DRYC026		-10,4	-10,2	57,4						3,06
MILC026	0	-10,2	-10,0	60,8	1461	89	94	L ⁽¹²⁾	L	7,76
F10E00a	0	-10,2	-9,7	57,8	1524	8	99	L	L	3,32
F10E00b	0	-10,8	-10,1	57,4	1524	8	99	L	L	3,03
F10E10a	10	-11,0	-10,1	57,4	1524	8	99	L	L	3,08
F10E10b	10	-10,9	-10,0	57,4	1524	8	99	L	L	3,15
F10E20a	20	-10,8	-9,9	57,7	1524	8	99	L	L	3,16
F10E20b	20	-10,8	-9,9	57,7	1524	8	99	L	L	3,17
F10E30a	30	-11,2	-10,2	57,7	1524	8	99	L	L	3,10
F10E30b	30	-11,1	-10,2	57,3	1524	8	99	L	L	2,97
F10E40a	40	-11,5	-10,2	57,3	1524	8	99	L	L	2,88
F10E40b	40	-11,2	-10,2	57,5	1524	8	99	L	L	3,31
F10E50a	50	-10,8	-10,8	57,6	1524	8	99	L	L	3,41
F10E50b	50	-10,4	-10,5	57,2	1524	8	99	L	L	3,12
F10E60a	60	-9,7	-9,8	57,6	1524	8	99	L	S(p) ⁽¹⁴⁾	3,43
F10E60b	60	-10,9	-9,9	58,0	1524	8	99	L	S(p)	3,97
F10E60c	60	-11,0	-10,0	58,1	1524	8	99	L	S(p)	4,03
F10E60d	60	-10,9	-10,1	58,6	1524	8	99	L	S(p)	4,41
F10E70a	70	-10,6	-8,7	64,3	1524	8	99	S(b) ⁽¹³⁾	S(m) ⁽¹⁵⁾	11,70
F10E70b	70	-10,6	-8,5	59,9	1524	8	99	S(b)	S(m)	6,79
F10E70c	70	-10,8	-8,6	61,1	1524	8	99	S(b)	S(m)	8,43
MILC027	0	-10,6	-9,9	61,2	1461	89	94	L	L	8,20
DRYC027		-10,8	-10,0	57,2						2,99

(1) Fluide prédilué.

(2) D : Pourcentage de dilution aqueuse.

(3) T_a et (4) T_f : Température de l'air et du fluide.

(5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.

(6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après application.

(7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(9) P0 : État du fluide après l'application.

(10) P1 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(11) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(12) L : Liquide homogène.

(13) S(b) : Beaucoup de «névasse».

(14) S(p) : Un peu de «névasse».

(15) S(m) : «Névasse» moyenne.

Tableau D.2 Effet de la dilution homogène (échantillon I-B à -20 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (μm)	E ⁽⁸⁾ (%)	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	δ* ⁽¹¹⁾ (mm)
DRYE062		-21,3	-21,2	57,5						3,00
MILE047	0	-21,0	-20,7	63,8	1461	203	86	L	L	11,10
F20E00a	0	-21,3	-21,1	57,9	1524	8	99	L	L	3,41
F20E00b	0	-20,8	-20,8	57,7	1524	8	99	L	L	3,45
F20E10a	10	-20,5	-20,4	57,4	1524	8	99	L	L	3,15
F20E10b	10	-20,2	-20,1	57,9	1524	8	99	L	L	3,16
F20E20a	20	-20,8	-20,3	57,7	1524	8	99	L	L	3,23
F20E20b	20	-20,9	-20,3	58,1	1524	8	99	L	L	3,23
F20E25b	25	-20,6	-20,7	79,5	1524	8	99	L	L	2,89
F20E25c	25	-20,9	-20,7	79,5	1524	8	99	L	L	2,67
F20E30a	30	-21,1	-20,3	61,2	1524	8	99	L	L	7,74
F20E30b	30	-21,1	-20,3	60,7	1524	8	99	L	L	7,39
F20E30c	30	-21,0	-20,2	59,2	1524	8	99	L	L	5,09
F20E30d	30	-20,9	-20,1	57,3	1524	8	99	L	L	3,51
F20E30e	30	-21,0	-20,2	58,2	1524	8	99	L	L	4,11
F20E30f	30	-20,8	-20,2	60,9	1524	8	99	L ⁽¹²⁾	L	7,78
F20E32a	32	-20,8	-20,0	79,5	1524	gelé		L+S(m) ⁽¹³⁾	S(p) ⁽¹⁴⁾	4,83
F20E32b	32	-20,9	-19,9	79,5	1588	gelé		L+S(m)	S(p)	8,85
F20E32c	32	-21,1	-19,9	79,5	1651	gelé		L+S(m)	S(p)	8,47
MILE047	0	-21,0	-20,7	63,8	1461	203	86	L	L	11,10
MILE048	0	-20,7	-20,1	63,3	1461	203	86	L	L	11,12
MILE055	0	-21,3	-21,2	79,5	1461	203	86	L	L	10,92
DRYE063		-21,0	-20,4	57,5						3,04
DRYE064		-20,6	-20,3	58,0						3,09
DRYE071		-21,3	-21,3	79,5						2,84

(1) Fluide prédilué.

(2) D : Pourcentage de dilution aqueuse.

(3) T_a et (4) T_f : Température de l'air et du fluide.

(5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.

(6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application.

(7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(9) P0 : État du fluide après l'application.

(10) P1 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(11) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(12) L : Liquide homogène.

(13) L+S(m) : Liquide+ «névasse» moyenne.

(14) S(p) : Un peu de «névasse».

Tableau D.3 Effet de la contamination par la bruine verglaçante
(échantillon I-B à -10 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (μm)	E ⁽⁸⁾ (%)	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	P2 ⁽¹¹⁾	δ* ⁽¹²⁾ (mm)
DRYC030		-10,9	-10,4	57,8							3,09
MILC030	0	-10,6	-9,9	60,9	1524	140	91	L ⁽¹³⁾	L	L	7,81
F10B00a	0	-10,6	-9,9	57,9	1524	8	99	L	L	L	3,55
F10B00b	0	-10,3	-9,9	57,7	1609	8	100	L	L	L	3,37
F10B10a	10	-10,6	-10,5	57,9	1270	8	99	L	L	L	3,33
F10B10b	10	-10,3	-10,1	57,8	1058	8	99	L	L	L	3,23
F10B20b	20	-10,7	-10,1	57,7	1016	8	99	L	L,S(p) ⁽¹⁴⁾	L	3,30
F10B20c	20	-10,2	-9,9	57,4	1016	8	99	L	L,S(p)	L	3,38
F10B30a	30	-10,9	-10,1	57,7	1185	8	99	L	L,S(p)	L	3,40
F10B30b	30	-10,5	-10,1	57,7	974	8	99	L	L,S(p)	L	3,34
F10B40a	40	-10,7	-10,1	57,6	974	8	99	L	L,S(p)	L	3,28
F10B40b	40	-10,9	-10,1	57,3	974	8	99	L	L,S(p)	L	3,40
F10B50a	50	-11,1	-10,4	57,6	1693	8	100	L	L,S(p)	L	3,42
F10B50b	50	-10,6	-9,7	57,3	1312	8	99	L	L,S(p)	L	3,07
F10B60a	60	-11,1	-9,6	58,8	1482	8	99	L	S(p) ⁽¹⁵⁾	S(p)	5,23
F10B60b	60	-11,8	-9,9	58,3	1439	8	99	L	S(p)	S(p)	4,21
F10B60c	60	-11,2	-9,6	58,0	1312	8	99	L	S(p)	S(p)	3,55
F10B70a	70	-11,2	-9,9	59,9	1651	8	100	L	S(b) ⁽¹⁶⁾	S(b)	6,36
F10B70b	70	-12,0	-9,9	61,9	1609	8	100	L	S(b)	S(b)	9,54
MILC031	0	-11,2	-10,1	60,9	1524	140	91	L	L	L	7,84
DRYC031		-11,5	-10,3	57,7							2,99

- (1) Fluide tel que reçu contaminé par la bruine.
- (2) D : Pourcentage de dilution en bruine verglaçante.
- (3) T_a et (4) T_f : Température de l'air et du fluide.
- (5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.
- (6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application.
- (7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.
- (8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.
- (9) P0 : État du fluide avant précipitations de la bruine.
- (10) P1 : État du fluide après précipitations de la bruine.
- (11) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination
- (12) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.
- (13) L : Liquide homogène.
- (14) L+S(p) : Liquide+ un peu de «névasse».
- (15) S(p) : Un peu de «névasse».
- (16) S(b) : Beaucoup de «névasse».

Tableau D.4 Effet de la contamination par la bruine verglaçante
(échantillon I-B à -20 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (μm)	E ⁽⁸⁾ (%)	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	P2 ⁽¹¹⁾	δ* ⁽¹²⁾ (mm)
DRYE081		-21,1	-21,4	68,5							2,89
MILE065	0	-21,0	-21,0	67,5	1461	191	87	L	L ⁽¹³⁾	L	10,77
F20B00a	0	-21,2	-20,4	68,5	1524	8	100	L	L	L	3,24
F20B00b	0	-20,9	-20,5	68,5	1524	8	100	L	L	L	3,21
F20B10a	10	-21,3	-20,6	70,4	1101	8	99	L	L,S(p) ⁽¹⁴⁾	L	3,35
F20B10b	10	-21,1	-20,2	73,4	1143	8	99	L	L,S(p)	L	3,51
F20B20a	20	-21,1	-19,9	74,4	1101	8	99	L	L,S(m) ⁽¹⁵⁾	L	4,19
F20B20d	20	-21,6	-20,7	75,3	1438	8	99	L	L,S(m)	L	3,64
F20B30a	30	-20,5	-19,3	75,4	1185	8	99	L	L,S(m)	S(p) ⁽¹⁶⁾	9,68
F20B30b	30	-21,0	-18,9	75,4	1312	8	99	L	L,S(m)	S(p)	4,87
F20B30c	30	-21,2	-18,7	75,4	1185	8	99	L	L,S(m)	S(p)	4,98
F20B30d	30	-21,3	-19,4	76,4	1651	8	100	L	L,S(m)	S(p)	4,65
F20B40a	40	-21,2	-18,8	76,4	1736	8	100	L	S(b) ⁽¹⁷⁾	S(p)	9,08
F20B40b	40	-20,6	-18,7	76,4	1905	8	100	L	S(b)	S(p)	8,70
MILE066	0	-20,9	-19,6	74,4	1524	204	87	L	L	L	10,56
DRYE082		-20,7	-19,5	74,4							2,98

(1) Fluide tel que reçu contaminé par la bruine.

(2) D : Pourcentage de dilution en bruine verglaçante.

(3) T_a et (4) T_f : Température de l'air et du fluide.

(5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.

(6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application.

(7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(9) P0 : État du fluide avant précipitations de la bruine.

(10) P1 : État du fluide après précipitations de la bruine.

(11) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(12) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(13) L : Liquide homogène.

(14) L+S(p) : liquide + un peu «névasse».

(15) L+S(m) : Liquide + «névasse» moyenne.

(16) S(p) : Un peu de «névasse».

(17) S(b) : Beaucoup de «névasse».

Tableau D.5 Effet de la contamination par la neige (échantillon I-B à -10 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh (%)	ε(0) ⁽⁵⁾ (µm)	ε(f) ⁽⁶⁾ (µm)	E ⁽⁷⁾ (%)	τ ⁽⁸⁾	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	P2 ⁽¹¹⁾	δ* (mm)
DRYC028		-10,8	-11,2	57,7								3,02
MILC028	0	-10,5	-10,4	61,3	1524	116	92		L		L	7,87
F10N00a	0	-10,5	-10,2	57,7	1524	8	99		L	L	L	3,26
F10N00b	0	-10,5	-9,9	57,8	1524	8	99		L	L	L	3,37
F10N10a	10	-10,1	-11,3	58,1	1228	8	99	3,6	L	L	L	3,51
F10N10d	10	-9,2	-10,8	57,6	1397	8	99	3,6	L	L	L	3,28
F10N20a	20	-9,4	-11,4	57,9	1270	8	99	7,2	L+S(p) ⁽¹²⁾	L+S(p)	L	3,38
F10N20b	20	-9,6	-11,6	57,8	1524	8	99	7,2	L+S(p)	L+S(p)	L	3,41
F10N30a	30	-9,1	-11,4	57,3	1693	8	100	10,8	L+S(m) ⁽¹³⁾	L+S(m)	L	3,32
F10N30b	30	-9,0	-11,2	58,1	1778	8	100	10,8	L+S(m)	L+S(m)	L	3,36
F10N40b	40	-9,0	-11,0	57,8	2032	8	100	14,4	L+S(b) ⁽¹⁴⁾	L+S(m)	L	3,28
F10N40c	40	-9,4	-11,3	57,3	1947	8	100	14,4	L+S(b)	L+S(m)	L	3,22
F10N50a	50	-9,1	-11,0	59,4	2032	8	100	18	n(p)+S(b) ⁽¹⁵⁾	S(b)	L	5,52
F10N50b	50	-8,9	-10,7	58,4	2032	8	100	18	n(p)+S(b)	S(b)	L	4,42
F10N60a	60	-9,0	-10,5	58,7	2400	8	100	21,6	n(m),S(b) ⁽¹⁶⁾	n(p),S(b)	L	4,86
F10N60b	60	-9,1	-10,4	60,5	2400	8	100	21,6	n(m),S(b)	n(p),S(b)	L	6,92
F10N60c	60	-9,1	-10,5	60,2	2400	8	100	21,6	n(m),S(b)	n(p),S(b)	L	6,82
F10N70a	70	-9,0	-10,2	60,5	3100	8	100	25,2	n(b),S(b) ⁽¹⁷⁾	n(p),S(b)	L	6,98
F10N70b	70	-9,1	-10,2	60,7	3100	8	100	25,2	n(b),S(b)	n(p),S(b)	L	7,48
F10N70c	70	-9,1	-10,2	60,4	3100	8	100	25,2	n(b),S(b)	n(p),S(b)	L	6,88
F10N75a	75	-9,2	-10,3	61,5	3900	8	100	27	n(b),S(b)	n(b),S(b)	L	8,11
F10N75b	75	-9,1	-10,1	62,9	3900	8	100	27	n(b),S(b)	n(b),S(b)	L	10,89
MILC029	0	-8,8	-8,6	60,1	1461	116	92		L		L	6,84
DRYC029		-8,9	-9,2	57,0								2,87

(1) Fluide tel que reçu contaminé par la neige. La densité de la neige : d = 0,3 g/cm³

(2) D : Pourcentage de dilution en neige.

(3) T_a et (4) T_f : Températures de l'air et du fluide.

(5) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application de la neige.

(6) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(7) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(8) τ : Temps d'attente incluant le temps pour appliquer la neige.

(9) P0 : État du fluide au cours de l'application de la neige.

(10) P1 : État du fluide après l'application de la neige.

(11) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(12) L+S(p) : Liquide+un peu de «névasse».

(13) L+S(m) : Liquide+»névasse» moyenne.

(14) L+S(b) : Liquide+beaucoup de «névasse».

(15) n(p)+S(b) : Un peu de neige+beaucoup de «névasse».

(16) n(m)+S(b) : Neige moyenne+beaucoup de «névasse».

(17) n(b)+S(b) : Beaucoup de neige+beaucoup de «névasse».

Tableau D.6 Effet de la contamination par la neige (échantillon I-B à -20 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh (%)	ε(0) ⁽⁵⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁶⁾ (μm)	E ⁽⁷⁾ (%)	τ ⁽⁸⁾	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	P2 ⁽¹¹⁾	δ* (mm)
DRYE073		-21,3	-21,5	79,5								2,87
MILE057	0	-21,3	-21	79,5	1461	204	86		L	L	L	10,88
F20N00a	0	-20,8	-20,6	79,5	1524	8	100		L	L	L	3,11
F20N00b	0	-20,8	-20,6	79,5	1524	8	100		L	L	L	3,14
F20N10a	10	-21,2	-21,3	79,5	1355	8	99	3,6	L	L	L	3,26
F20N10b	10	-21	-21,7	79,4	1439	8	99	3,6	L	L	L	3,13
F20N20a	20	-21,2	-21,6	79,5	1439	8	99	7,2	L+S(p) ⁽¹²⁾	L+S(p)	L	3,50
F20B20b	20	-20,9	-21,7	79,5	1566	8	100	7,2	L+S(p)	L+S(p)	L	3,55
F20N30a	30	-20,9	-21,7	79,5	1736	8	100	10,8	L+S(m) ⁽¹³⁾	L+S(m)	L	4,09
F20N30b	30	-21,3	-21,7	79,3	1651	8	100	10,8	L+S(m)	L+S(m)	L	3,66
F20N30C	30	-20,8	-21,7	79,5	1820	8	100	14,4	L+S(m)	L+S(m)	L	4,04
F20N35a	35	-21	-21,5	79,5	1863	8	100	14,4	L+S(b) ⁽¹⁴⁾	L+S(b)	L	3,76
F20N35b	35	-20,9	-21,6	79,4	2032	8	100	14,4	L+S(b)	L+S(b)	L	3,76
F20N40a	40	-20,9	-21,5	79,4	1863	8	100	18	L+S(b)	L+S(b)	L	3,80
F20N40b	40	-20,8	-21,6	79,4	2032	8	100	18	L+S(b)	L+S(b)	L	6,38
F20N40C	40	-21,1	-21,6	79,2	2032	8	100	21,6	L+S(b)	L+S(b)	L	4,05
F20N50a	50	-20,7	-21,6	79,5	2633	8	100	21,6	n(p)+S(b) ⁽¹⁵⁾	S(b)	L	7,95
F20N50b	50	-20,9	-21,6	79,5	2533	8	100	21,6	n(m), S(b) ⁽¹⁶⁾	n(p), S(b) ⁽¹⁷⁾	L	8,94
MILE058	0	-20,5	-20,7	79,5	1461	204	86		L	L	L	10,96
DRYE074		-21,1	-21	79,4								2,82

(1) Fluide tel que reçu contaminé par la neige. La densité de la neige : d = 0,3 g/cm³.

(2) D : Pourcentage de dilution en neige.

(3) T_a et (4) T_f : Températures de l'air et du fluide.

(5) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application de la neige.

(6) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(7) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(8) τ : Temps d'attente incluant le temps pour appliquer la neige.

(9) P0 : État du fluide au cours de l'application de la neige.

(10) P1 : État du fluide après l'application de la neige.

(11) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(12) L+S(p) : Liquide+un peu de «névasse».

(13) L+S(m) : Liquide+»névasse» moyenne.

(14) L+S(b) : Liquide+beaucoup de «névasse».

(15) n(p)+S(b) : Un peu de neige+beaucoup de «névasse».

(16) n(m)+S(b) : Neige moyenne+beaucoup de «névasse».

(17) n(b)+S(b) : Beaucoup de neige+beaucoup de «névasse».

Annexe E Paramètres des essais d'élimination : échantillon II-C

Tableau E.1 Effet de la dilution homogène (échantillon II-C à -10 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (μm)	E ⁽⁸⁾ (%)	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	δ ⁽¹¹⁾ (mm)
DRY10Ea		-10,4	-10,7	77,5						3,12
DRY10Eb		-10,5	-10,4	57,7						3,11
M10E00a	0	-10,4	-10,2	76,5	1461	140	91	L ⁽¹²⁾	L	7,83
M10E00b	0	-10,4	-10,3	60,5	1524	135	91	L	L	7,95
A10E00a	0	-10,1	-9,8	76,5	1588	178	89	L	L	8,74
A10E00b	0	-10,2	-10,4	61,1	1524	161	89	L	L	7,91
A10E10a	10	-10,3	-9,8	75,5	1524	186	88	L	L	8,56
A10E10b	10	-10,4	-10,5	61,4	1524	228	85	L	L	8,44
A10E20a	20	-10,3	-10,0	75,5	1566	237	85	L	L	8,25
A10E20b	20	-10,5	-10,6	61,2	1524	220	86	L	L	8,00
A10E30a	30	-10,6	-10,1	75,5	1566	228	85	L	L	7,12
A10E30b	30	-10,3	-10,5	60,3	1524	228	85	L	L	7,11
A10E40a	40	-10,5	-10,1	75,5	1609	228	86	L	L	7,98
A10E40b	40	-10,3	-10,4	59,7	1524	127	92	L	L	6,25
A10E40c	40	-10,3	-10,5	77,4	1524	220	86	L	L	6,25
A10E50a	50	-10,6	-10,1	75,5	1693	178	90	L	L	5,35
A10E50b	50	-10,4	-10,1	59,1	1524	220	86	L	L	5,47
A10E60a	60	-10,4	-10,1	75,5	1736	161	91	L	L	4,91
A10E60b	60	-10,3	-10,0	58,7	1524	228	85	L	L+S(p) ⁽¹⁴⁾	4,92
A10E62a	62	-9,8	-8,9	77,4	1355	gèle		L,S(b) ⁽¹³⁾	L,S(p)	11,64
A10E62b	62	-10,5	-9,1	62,2	1524	gèle		L,S(b)	L,S(p)	10,06
A10E65a	65	-10,3	-8,5	75,5	1736	gèle		L,S(b)	L,S(p)	12,60
A10E65b	65	-10,3	-8,3	65,8	gèle			L,S(b)	L,S(p)	14,39
M10E00c	0	-10,0	-9,1	60,6	1397	127	91	L	L	7,89
DRY10c		-9,8	-9,3	57,8						3,21

(1) Fluide prédilué.

(2) D : Pourcentage de dilution aqueuse.

(3) T_a et (4) T_f : Température de l'air et du fluide.

(5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.

(6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application.

(7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(9) P0 : État du fluide après l'application.

(10) P1 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(11) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(12) L : Liquide homogène.

(13) L+S(b) : Liquide+ beaucoup de «névasse».

(14) L+S(p) : Liquide + un peu de «névasse».

Tableau E.2 Effet de la dilution homogène (échantillon II-C à -20 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (μm)	E ⁽⁸⁾ (%)	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	δ* ⁽¹¹⁾ (mm)
DRYE067		-21,0	-20,7	75,5						2,96
DRYE068		-20,9	-20,2	75,3						2,88
MILE051	0	-20,8	-20,4	75,5	1397	229	84	L ⁽¹²⁾	L	10,97
MILE052	0	-21,1	-20,2	75,0	1397	229	84	L	L	10,93
A20E00a	0	-20,9	-20,5	75,5	1524	178	88	L	L	8,07
A20E00b	0	-20,5	-20,5	75,5	1461	178	88	L	L	8,67
A20E00C	0	-20,5	-20,4	75,5	1461	166	89	L	L	8,5
A20E10a	10	-21,1	-20,6	74,6	1524	254	83	L	L	9,17
A20E10b	10	-21,2	-20,5	74,5	1524	279	82	L	L	8,98
A20E20a	20	-21,0	-20,5	75,6	1524	229	85	L	L	9,24
A20E20b	20	-20,6	-20,5	75,5	1461	292	80	L	L	9,28
A20E20C	20	-20,7	-20,5	75,5	1524	292	81	L	L	9,45
A20E25a	25	-20,6	-20,5	79,5	1397	267	81	L	L	12,58
A20E25b	25	-20,3	-20,3	79,5	1397	254	82	L	L	12,78
A20E30a	30	-21,0	-20,1	75,6	1524	gèle		S(b) ⁽¹³⁾	S(m) ⁽¹⁴⁾	13,32
A20E30b	30	-20,8	-20,0	74,5	1524	gèle		S(b)	S(m)	12,85
MILE056	0	-20,4	-20,1	79,4	1461	191	87	L	L	10,67
DRYE072		-20,4	-20,1	79,5						2,89

(1) Fluide prédilué.

(2) D : Pourcentage de dilution aqueuse.

(3) T_a et (4) T_f : Température de l'air et du fluide.

(5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.

(6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après application.

(7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(9) P0 : État du fluide après l'application.

(10) P1 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(11) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(12) L : Liquide homogène.

(13) S(b) : Beaucoup de «névasse».

(14) S(m) : «Névasse» moyenne.

Tableau E.3 Effet de la bruine verglaçante (échantillon II-C à -10 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (μm)	E ⁽⁸⁾ (%)	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	P2 ⁽¹¹⁾	δ* ⁽¹²⁾ (mm)
DRY10Bb		-10,0	-9,9	75,5							3,09
M10B00a	0	-10,5	-9,8	76,5	1524	203	87	L	L ⁽¹³⁾	L	8,31
M10B00b	0	-9,9	-9,6	75,5	1524	110	93	L	L	L	7,76
A10B00a	0	-10,5	-9,9	76,5	1524	229	85	L	L	L	8,57
A10B00c	0	-10,0	-9,5	75,5	1482	186	87	L	L	L	8,12
A10B10a	10	-10,5	-10,3	77,4	1651	237	86	L	L,S(p) ⁽¹⁴⁾	L	8,53
A10B10b	10	-10,2	-10,1	75,5	1566	186	88	L	L,S(p)	L	8,32
A10B20a	20	-10,9	-10,6	74,5	1651	195	88	L	L,S(p)	L	8,82
A10B20b	20	-10,3	-10,5	74,5	1566	178	89	L	L,S(p)	L	8,34
A10B30a	30	-10,6	-10,8	75,5	1609	195	88	L	L,S(b)	L	8,66
A10B30b	30	-10,9	-10,6	74,5	1566	178	89	L	L,S(b)	L	8,37
A10B40a	40	-11,0	-10,6	74,5	1863	195	90	L	L,S(b)	L	8,49
A10B40b	40	-10,7	-10,4	76,5	1566	169	89	L	L,S(b)	L	8,21
A10B50a	50	-10,7	-10,4	74,5	1820	178	90	L	L,S(b)	L	8,46
A10B50b	50	-10,8	-10,8	73,5	1609	169	89	L	L,S(b)	L	7,81
A10B60a	60	-10,5	-10,3	74,5	1947	127	93	L	L,S(b)	L,S(p)	12,02
A10B60b	60	-10,6	-10,0	75,5	1693	186	89	L	L,S(b)	L,S(p)	11,42
A10B60c	60	-10,2	-9,9	75,4	1524	203	87	L	L,S(b)	L,S(p)	7,79
A10B60d	60	-10,3	-10,1	74,5	1651	186	89	L	L,S(b)	L,S(p)	13,29
A10B60e	60	-10,6	-10,0	75,5	1863	127	93	L	L,S(b)	L,S(p)	10,73
A10B60f	60	-10,6	-10,0	75,5	1566	118	92	L	L,S(b)	L,S(p)	11,37

(1) Fluide tel que reçu contaminé par la bruine.

(2) D : Pourcentage de dilution en bruine verglaçante.

(3) T_a et (4) T_f : Température de l'air et du fluide.

(5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.

(6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application.

(7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(9) P0 : État du fluide avant précipitations de la bruine.

(10) P1 : État du fluide après précipitations de la bruine.

(11) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(12) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(13) L : Liquide homogène.

(14) L+S(p) : Liquide+ un peu de «névasse».

Tableau E.4 Effet de la bruine verglaçante (échantillon II-C à -20 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (μm)	E ⁽⁸⁾ (%)	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	P2 ⁽¹¹⁾	δ* ⁽¹²⁾ (mm)
DRYE085		-20,5	-20,1	73,4							2,89
MILE069	0	-20,4	-20,1	69,4	1524	178	88	L	L ⁽¹³⁾	L	10,38
A20B00a	0	-20,4	-20,1	67,9	1482	195	87	L	L	L	12,03
A20B00b	0	-20,4	-19,9	67,5	1482	186	87	L	L	L	10,16
A20B00C	0	-20,4	-19,9	67,5	1482	186	87	L	L	L	9,52
A20B10a	10	-20,4	-20,1	70,4	1524	211	86	L	L,S(m) ⁽¹⁴⁾	L	8,47
A20B10b	10	-20,2	-19,8	71,4	1651	220	87	L	L,S(m)	L	8,44
A20B20a	20	-20,6	-20,5	73,4	1778	246	86	L	L,S(b) ⁽¹⁵⁾	S(p) ⁽¹⁷⁾	9,36
A20B20b	20	-20,4	-19,9	74,4	1736	254	85	L	L,S(b)	S(p)	9,19
A20B30a	30	-20,2	-19,1	73,8	1947	271	86	L	S(b) ⁽¹⁶⁾	S(p)	10,06
A20B30b	30	-20,1	-18,8	74,4	2032	355	83	L	S(b)	S(p)	9,98
A20B40a	40	-20,5	-19,9	75,4	2032	669	67	L	S(b)	S(m) ⁽¹⁸⁾	11,72
A20B40b	40	-20,6	-19,0	75,4	2032	457	78	L	S(b)	S(m)	11,34
A20B50a	50	-20,5	-18,6	75,4	2032	1016	50	L	S(b)	S(m)	12,77
A20B50b	50	-20,2	-18,5	74,4	2032	1058	48	L	S(b)	S(m)	14,27
MILE070	0	-20,4	-18,9	70,4	1651	229	86	L	L,S(b)	L,S(p) ⁽¹⁹⁾	10,27
DRYE086		-20,3	-18,7	72,4							2,88

- (1) Fluide tel que reçu contaminé par la bruine.
- (2) D : Pourcentage de dilution en bruine verglaçante.
- (3) T_a et (4) T_f : Température de l'air et du fluide.
- (5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.
- (6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application.
- (7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.
- (8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.
- (9) P0 : État du fluide avant précipitations de la bruine.
- (10) P1 : État du fluide après précipitations de la bruine.
- (11) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.
- (12) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.
- (13) L : Liquide homogène.
- (14) L+S(m) : Liquide + «névasse» moyenne.
- (15) L+S(b) : Liquide+ beaucoup de «névasse».
- (16) S(b) : Beaucoup de «névasse».
- (17) S(p) : Un peu de «névasse».
- (18) S(m) : «Névasse» moyenne.
- (19) L+S(p) : Liquide+ un peu de «névasse».

Tableau E.5 Effet de la contamination par la neige (échantillon II-C à -10 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (μm)	E ⁽⁸⁾ (%)	τ ⁽⁹⁾	P0 ⁽¹⁰⁾	P1 ⁽¹¹⁾	P2 ⁽¹²⁾	δ* ⁽¹³⁾ (mm)
DRYC002		-10,4	-10,7	57,7								3,07
MIILC002	0	-10,0	-9,9	60,5	1524	110	93		L ⁽¹⁴⁾	L	L	7,77
A10N00c	0	-10,5	-9,6	61,6	1482	203	86		L	L	L	8,23
A10N00d	0	-10,4	-9,8	61,3	1482	186	87		L	L	L	8,23
A10N10c	10	-10,6	-10,5	61,6	1397	186	87	3,6	L+S(p) ⁽¹⁵⁾	L	L	8,52
A10N10d	10	-10,5	-10,5	61,3	1397	195	86	3,6	L+S(p)	L	L	8,53
A10N20c	20	-10,3	-10,8	61,4	1482	203	86	7,2	L+S(p)	L+S(p)	L	8,52
A10N20d	20	-10,3	-10,8	62,1	1397	203	85	7,2	L+S(p)	L+S(p)	L	8,67
A10N30c	30	-10,0	-10,9	61,7	1566	187	88	10,8	L+S(p)	L+S(p)	L	8,48
A10N30d	30	-10,0	-10,8	62,0	1566	187	88	10,8	L+S(p)	L+S(p)	L	8,83
A10N40j	40	-9,3	-10,5	62,4	1693	203	88	14,4	LS(b)n(p) ⁽¹⁶⁾	LS(b)n(p)	L+S(p)	9,88
A10N40k	40	-9,1	-10,1	62,1	1736	186	89	14,4	LS(b)n(p)	LS(b)n(p)	L+S(p)	9,01
A10N50d	50	-10,3	-11,0	64,9	1778	212	88	18	LS(b)n(p)	LS(b)n(p)	L+S(p)	12,79
A10N50e	50	-10,2	-11,2	64,7	1863	212	89	18	LS(b)n(p)	LS(b)n(p)	L+S(p)	12,65

(1) Fluide tel que reçu contaminé par la neige. La densité de la neige : d = 0,3 g/cm³

(2) D : Pourcentage de dilution en neige.

(3) T_a et (4) T_f : Températures de l'air et du fluide.

(5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.

(6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application de la neige.

(7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(9) τ : Temps d'attente incluant le temps pour appliquer la neige.

(10) P0 : État du fluide au cours de l'application de la neige.

(11) P1 : État du fluide après l'application de la neige.

(12) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(13) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(14) L : Liquide homogène.

(15) L+S(p) : Liquide+un peu de «névasse».

(16) L+S(b)+n(p) : Liquide+ beaucoup de «névasse» +un peu de neige.

Tableau E.6 Effet de la contamination par la neige (échantillon II-C à -20 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (μm)	E ⁽⁸⁾ (%)	τ ⁽⁹⁾	P0 ⁽¹⁰⁾	P1 ⁽¹¹⁾	P2 ⁽¹²⁾	δ* ⁽¹³⁾ (mm)
DRYE077		-21,0	-21,0	77,5								2,94
MILE061	0	-20,5	-20,6	78,4	1397	254	82		L ⁽¹⁴⁾	L	L	10,78
A20N00a	0	-20,2	-20,2	78,5	1439	203	86		L	L	L	7,92
A20N00b	0	-20,2	-20,1	78,4	1524	212	86		L	L	L	7,66
A20N10a	10	-20,1	-20,5	77,6	1524	305	80	3,6	L+S(m) ⁽¹⁵⁾	L+S(p) ⁽¹⁷⁾	L+S(p)	9,44
A20N10b	10	-20,1	-20,4	77,6	1524	305	80	3,6	L+S(m)	L+S(p)	L+S(p)	9,04
A20N20a	20	-20,2	-20,6	78,5	1693	322	81	7,2	L+S(m)	L+S(m)	L+S(p)	10,51
A20N20b	20	-20,1	-20,7	78,4	1482	440	70	7,2	L+S(m)	L+S(m)	L+S(p)	10,08
A20N25a	25	-20,1	-20,6	77,5	1651	421	75	9	L+S(b) ⁽¹⁶⁾	L+S(b)	L+S(m)	10,86
A20N25b	25	-20,3	-20,5	77,5	1566	373	76	9	L+S(b)	L+S(b)	L+S(m)	10,59
A20N30a	30	-20,3	-20,7	77,5	1778	381	79	10,8	L+S(b)	L+S(b)	L+S(m)	11,77
A20N30b	30	-20,0	-20,8	77,5	1820	406	78	10,8	L+S(b)	L+S(b)	L+S(m)	11,27
MILE062	0	-20,2	-20,2	77,5	1461	191	87		L	L	L	10,63
DRYE078		-20,0	-20,4	77,5								2,96

(1) Fluide tel que reçu contaminé par la neige. La densité de la neige : d = 0,3 g/cm³

(2) D : Pourcentage de dilution en neige.

(3) T_a et (4) T_f : Températures de l'air et du fluide.

(5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.

(6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application de la neige.

(7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(9) τ : Temps d'attente incluant le temps pour appliquer la neige.

(10) P0 : État du fluide au cours de l'application de la neige.

(11) P1 : État du fluide après l'application de la neige.

(12) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(13) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(14) L : Liquide homogène.

(15) L+S(m) : Liquide + «nèvasser» moyenne.

(16) L+S(b) : Liquide+ beaucoup de «nèvasser».

(17) L+S(p) : Liquide+ un peu de «nèvasser».

Annexe F Paramètres des essais d'élimination : échantillon IV-D

Tableau F.1 Effet de la dilution homogène (échantillon IV-D à -10 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (μm)	E ⁽⁸⁾ (%)	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	δ* ⁽¹¹⁾ (mm)
DRYC004		-10.5	-10.7	57.8						3.21
MILC004	0	-10.2	-10.2	60.7	1461	140	90			8.10
C10E00a	0	-10.3	-10.3	59.9	1588	76	95	L ⁽¹²⁾	L	6.27
C10E00b	0	-10.2	-9.9	60.0	1588	76	95	L	L	6.43
C10E10a	10	-10.1	-9.8	59.4	1588	76	95	L	L	5.94
C10E10b	10	-10.1	-9.9	59.6	1588	85	95	L	L	5.88
C10E20a	20	-9.9	-9.8	58.8	1524	85	94	L	L	5.36
C10E20b	20	-10.5	-10.2	59.0	1524	85	94	L	L	5.27
C10E30a	30	-10.3	-10.1	58.9	1651	85	95	L	L	5.01
C10E30b	30	-10.4	-10.1	58.8	1524	93	94	L	L	5.00
C10E40a	40	-10.8	-10.2	58.7	1524	59	96	L	L	4.77
C10E40b	40	-10.5	-10.1	58.8	1524	59	96	L	L	4.67
C10E50a	50	-10.3	-10.1	58.6	1651	25	98	L	L	4.29
C10E50b	50	-10.3	-10.0	58.3	1524	25	98	L	L	4.24
C10E60a	60	-10.5	-10.1	58.3	1524	17	99	L	L	3.88
C10E60b	60	-10.5	-10.2	58.1	1588	17	99	L	L	3.82
C10E70a	70	-10.7	-10.1	58.1	1524	8	99	L	L	3.87
C10E70b	70	-10.8	-10.0	58.0	1524	8	99	L	L	3.74
C10E72a	72	-10.2	-9.4	61.9	gelé			L,S(b) ⁽¹³⁾	L+S(p) ⁽¹⁴⁾	9.03
C10E72b	72	-10.2	-9.0	60.4	gelé			L,S(b)	L,S(p)	7.17
MILC005	0	-10.5	-10.3	61.1	1524	140	91	L	L	8.12
DRYC005		-10.1	-10.5	57.8						3.22

- (1) Fluide prédilué.
- (2) D : Pourcentage de dilution aqueuse.
- (3) T_a et (4) T_f : Température de l'air et du fluide.
- (5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.
- (6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application.
- (7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.
- (8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.
- (9) P0 : État du fluide après l'application.
- (10) P1 : État du fluide après l'essai d'élimination.
- (11) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.
- (12) L : Liquide homogène.
- (13) L+S(b) : Liquide+ beaucoup de «névasse».
- (14) L+S(p) : Liquide + un peu de «névasse».

Tableau F.2 Effet de la dilution homogène (échantillon IV-D à -20 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (μm)	E ⁽⁸⁾ (%)	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	δ* ⁽¹¹⁾ (mm)
DRYE069		-21.6	-21.6	74.6						2.98
MILE053	0	-21.3	-21.2	75.5	1524	229	85			11.25
C20E00A	0	-21.2	-20.8	75.5	1651	166	90	L ⁽¹²⁾	L	7.23
C20E00B	0	-20.6	-20.5	75.6	1651	153	91	L	L	7.53
C20E10A	10	-20.6	-20.4	75.5	1524	140	91	L	L	6.28
C20E10B	10	-20.8	-20.3	75.5	1524	127	92	L	L	6.24
C20E20A	20	-20.4	-20.4	75.6	1524	89	94	L	L	5.35
C20E20B	20	-20.4	-20.2	75.6	1524	127	92	L	L	5.32
C20E30A	30	-20.5	-20.2	75.5	1524	114	93	L	L	5.59
C20E30B	30	-20.3	-20.2	75.5	1524	127	92	L	L	4.75
C20E30C	30	-20.3	-20.2	75.5	1588	140	91	L	L	4.67
C20E40A	40	-20.4	-20.6	75.5	1524	77	95	S(p) ⁽¹³⁾	L	6.40
C20E40B	40	-20.5	-20.3	75.6	1651	102	94	S(p)	L	8.78
C20E40C	40	-20.8	-20.5	75.5	1588	89	94	S(p)	L	8.45
C20E50A	50	-20.5	-20.8	75.5	1651	64	96	S(b) ⁽¹⁴⁾	L	7.55
C20E50B	50	-20.6	-20.7	75.6	1651	64	96	S(b)	L	9.75
C20E50C	50	-20.2	-20.5	75.5	1651	64	96	S(b)	L	10.22
MILE054	0	-20.8	-20.7	75.5	1397	229	84	L	L	10.88
DRYE070		-20.2	-20.4	75.5						2.72

(1) Fluide prédilué.

(2) D : Pourcentage de dilution aqueuse.

(3) T_a et (4) T_f : Température de l'air et du fluide.

(5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.

(6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après application.

(7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(9) P0 : État du fluide après l'application.

(10) P1 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(11) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(12) L : Liquide homogène.

(13) S(p) : Un peu de «névasse».

(14) S(b) : Beaucoup de «névasse».

Tableau F.3 Effet de la bruine verglaçante (échantillon IV-D à -10 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (μm)	E ⁽⁸⁾ (%)	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	P2 ⁽¹¹⁾	δ* ⁽¹²⁾ (mm)
DRYC007		-10.8	-10.9	58.1							3.25
MILC007	0	-10.4	-10.3	61.1	1397	102	93	L	L ⁽¹³⁾	L	8.35
C10B00a	0	-10.3	-10.0	60.4	1651	76	95	L	L	L	7.08
C10B00b	0	-9.9	-9.8	60.4	1651	68	96	L	L	L	6.86
C10B10a	10	-10.4	-10.3	60.0	1524	85	94	L	L	L	6.69
C10B10b	10	-10.2	-10.3	60.2	1524	102	93	L	L	L	6.48
C10B20a	20	-10.0	-9.9	59.7	1566	85	95	L	L	L	6.51
C10B20b	20	-10.1	-9.9	60.5	1566	76	95	L	L	L	6.55
C10B30a	30	-10.5	-10.3	59.7	1609	76	95	L	L	L	6.32
C10B30b	30	-10.9	-10.4	60.4	1651	85	95	L	L	L	6.33
C10B40a	40	-10.3	-10.2	59.3	1651	76	95	L	L	L	5.63
C10B40b	40	-10.6	-10.3	59.5	1482	93	94	L	L	L	5.68
C10B50a	50	-10.9	-10.3	59.2	1693	119	93	L	L	L	5.14
C10B50b	50	-10.9	-10.4	58.8	1651	76	95	L	L	L	5.19
C10B60a	60	-10.9	-10.4	59.0	1820	68	96	L	L,S(p) ⁽¹⁴⁾	L	4.95
C10B60b	60	-10.7	-10.2	59.8	1651	85	95	L	L,S(p)	L	4.62
C10B70a	70	-10.6	-9.4	59.3	1820	51	97	L	L,S(b) ⁽¹⁵⁾	L	4.97
C10B70b	70	-11.1	-10.0	59.3	1863	42	98	L	L,S(b)	L	5.16
C10B72b	72	-11.4	-9.9	62.5	1820	25	99	L	L,S(b)	L,S(p)	9.76
C10B75a	75	-10.2	-9.5	64.1	1693	34	98	L	L,g(b) ⁽¹⁶⁾	L,g(p) ⁽¹⁷⁾	11.62

(1) Fluide tel que reçu contaminé par la bruine.

(2) D : Pourcentage de dilution en bruine verglaçante.

(3) T_a et (4) T_f : Température de l'air et du fluide.

(5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.

(6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application.

(7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(9) P0 : État du fluide avant précipitations de la bruine.

(10) P1 : État du fluide après précipitations de la bruine.

(11) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(12) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(13) et (14) L : Liquide homogène; et L+S(p) : Liquide+ un peu de «névasse».

(15) et (16) L+S(b) : Liquide+ beaucoup de «névasse»; et L+g(b) : Liquide+ beaucoup de glace.

(17) L+g(p) : Liquide + un peu de glace.

Tableau F.4 Effet de la bruine verglaçante (échantillon IV-D à -20 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (µm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (µm)	E ⁽⁸⁾ (%)	P0 ⁽⁹⁾	P1 ⁽¹⁰⁾	P2 ⁽¹¹⁾	δ* ⁽¹²⁾ (mm)
DRYE087		-20.8	-20.7	72.3							2.73
MILE071	0	-20.5	-20.2	71.4	1651	178	89	L	L ⁽¹³⁾	L	10.03
C20B00A	0	-20.1	-19.8	70.4	1651	144	91	L	L	L	6.37
C20B00B	0	-20.1	-19.7	69.5	1609	169	90	L	L	L	6.96
C20B00C	0	-20.8	-21.1	68.2	1651	169	90	L	L	L	6.28
C20B10A	10	-20.9	-20.7	71.0	1693	161	91	L	L,S(p) ⁽¹⁴⁾	L	6.25
C20B10B	10	-20.8	-20.3	72.0	1566	161	90	L	L,S(p)	L	5.82
C20B20A	20	-20.8	-20.3	73.0	1947	110	94	L	L,S(p)	L	5.27
C20B20B	20	-20.5	-20.0	74.0	1651	169	90	L	L,S(b)	L	5.41
C20B30A	30	-20.5	-19.8	74.0	2032	203	90	L	L+S(m) ⁽¹⁵⁾	L	5.42
C20B30B	30	-20.8	-19.8	74.0	1736	152	91	L	L+S(m)	L	5.76
C20B40A	40	-20.3	-19.6	74.0	1778	51	97	L	S(b) ⁽¹⁶⁾	S(p) ⁽¹⁷⁾	5.99
C20B40B	40	-20.2	-19.6	74.3	2032	178	91	L	S(b)	S(p)	5.69
C20B50B	50	-20.5	-19.4	75.1	2032	127	94	L	S(b)	S(p)	6.48
C20B50C	50	-20.3	-19.1	75.1	2032	220	89	L	S(b)	S(p)	5.96
C20B55A	55	-18.7	-19.9	74.4	2032	119	94	L	S(b)	S(p)	9.40
C20B55B	55	-19.1	-19.4	74.4	2032	102	95	L	S(b)	S(p)	12.34
C20B60A	60	-21.2	-19.2	73.3	2032	127	94	L	S(b)	S(p)	8.94
C20B60B	60	-20.7	-18.8	76.2	2032	118	94	L	S(b)	S(p)	13.75
C20B60C	60	-20.5	-19.7	76.5	2032	161	92	L	S(b)	S(p)	13.64
MILE072	0	-20.2	-19.6	70.4	1524	191	88	L	L	L	9.91
DRYE088		-20.4	-19.7	71.4							2.72

(1) Fluide tel que reçu contaminé par la bruine.

(2) D : Pourcentage de dilution en bruine verglaçante.

(3) T_a et (4) T_f : Température de l'air et du fluide.

(5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.

(6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application.

(7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(9) P0 : État du fluide avant précipitations de la bruine.

(10) P1 : État du fluide après précipitations de la bruine.

(11) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(12) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(13) L : Liquide homogène.

(14) L+S(p) : Liquide+ un peu de «nèvasse».

(15) L+S(m) : Liquide + «nèvasse» moyenne.

(16) S(b) : Beaucoup de «nèvasse».

(17) S(p) : Un peu de «nèvasse».

Tableau F.5 Effet de la contamination par la neige (échantillon IV-D à -10 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (μm)	E ⁽⁸⁾ (%)	τ ⁽⁹⁾	P0 ⁽¹⁰⁾	P1 ⁽¹¹⁾	P2 ⁽¹²⁾	δ* ⁽¹³⁾ (mm)
DRYC006		-10.8	-10.7	58.0								3.19
MILC006	0	-10.3	-10.1	61.3	1397	91	93		L ⁽¹⁴⁾	L	L	8.22
C10N00a	0	-10.2	-10.2	60.1	1651	93	94		L	L	L	6.70
C10N00b	0	-10.0	-9.9	60.0	1566	93	94		L	L	L	6.70
C10N10a	10	-10.4	-10.4	60.1	1524	85	94	3.6	L	L	L	6.42
C10N10b	10	-10.1	-10.3	60.2	1524	85	94	3.6	L	L	L	7.13
C10N10c	10	-10.1	-10.1	60.1	1524	76	95	3.6	L	L	L	6.40
C10N20a	20	-10.0	-10.5	60.2	1524	68	96	7.2	L	L	L	6.37
C10N20b	20	-9.9	-10.4	59.9	1524	127	92	7.2	L	L	L	6.36
C10N30a	30	-9.8	-10.6	59.9	1524	93	94	10.8	L	L	L	6.64
C10N30b	30	-9.6	-10.4	60.0	1524	76	95	10.8	L	L	L	6.03
C10N30c	30	-9.8	-10.4	59.8	1609	110	93	10.8	L	L	L	6.13
C10N40a	40	-10.1	-10.9	59.3	1439	102	93	14.4	S(b) ⁽¹⁵⁾	L+S(m) ⁽¹⁶⁾	L	5.56
C10N40b	40	-9.8	-11.1	59.5	1439	102	93	14.4	S(b)	L+S(m)	L	5.62
C10N50a	50	-9.7	-10.9	59.5	1947	76	96	18	n(p)+s(b) ⁽¹⁷⁾	L+S(m)	L	5.61
C10N50b	50	-9.6	-10.8	59.7	1778	59	97	18	n(p)+s(b)	L+S(m)	L	5.40
C10N60a	60	-9.3	-10.4	59.7	1648	93	94	21.6	n(b)+s(b) ⁽¹⁸⁾	n(p)+s(b)	L	5.74
C10N60b	60	-9.4	-10.5	59.4	1648	85	95	21.6	n(b)+s(b)	n(p)+s(b)	L	5.46
C10N70a	70	-9.5	-10.4	63.7	2032	51	97	25.2	n(b)+s(b)	n(b)+s(b)	L	10.56
C10N70b	70	-9.2	-10.1	62.4	2032	51	97	25.2	n(b)+s(b)	n(b)+s(b)	L	9.29

(1) Fluide tel que reçu contaminé par la neige. La densité de la neige : d = 0,3 g/cm³

(2) D : Pourcentage de dilution en neige.

(3) T_a et (4) T_f : Températures de l'air et du fluide.

(5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.

(6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application de la neige.

(7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(9) τ : Temps d'attente incluant le temps pour appliquer la neige.

(10) P0 : État du fluide au cours de l'application de la neige.

(11) P1 : État du fluide après l'application de la neige.

(12) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(13) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(14) L : Liquide homogène.

(15) S(b) : Beaucoup de «névasse».

(16) L+S(m) : Liquide + «névasse» moyenne.

(17) n(p)+S(b) : un peu de neige + beaucoup de «névasse».

(18) n(b)+S(b) : Beaucoup de neige + beaucoup de «névasse».

Tableau F.6 Effet de la contamination par la neige (échantillon IV-D à -20 °C)

Libellé ⁽¹⁾	D ⁽²⁾ (%)	T _a ⁽³⁾ (°C)	T _f ⁽⁴⁾ (°C)	Rh ⁽⁵⁾ (%)	ε(0) ⁽⁶⁾ (μm)	ε(f) ⁽⁷⁾ (μm)	E ⁽⁸⁾ (%)	τ ⁽⁹⁾	P0 ⁽¹⁰⁾	P1 ⁽¹¹⁾	P2 ⁽¹²⁾	δ* ⁽¹³⁾ (mm)
DRYE079		-21.4	-21.2	65.5								2.88
MILE063	0	-21.0	-20.7	67.5	1651	165	90		L ⁽¹⁴⁾	L	L	10.76
C20N00A	0	-20.6	-20.5	67.5	1651	144	91		L	L	L	6.76
C20N00B	0	-20.4	-20.3	68.4	1566	144	91		L	L	L	6.74
C20N10A	10	-20.3	-20.7	67.5	1482	144	90	3.6	L	L	L	6.87
C20N10B	10	-20.2	-20.5	67.1	1609	110	93	3.6	L	L	L	6.36
C20N20A	20	-20.1	-20.7	67.0	1736	144	92	7.2	L+S(p) ⁽¹⁵⁾	L+S(p)	L	6.08
C20N20B	20	-20.3	-20.9	67.0	1693	118	93	7.2	L+S(p)	L+S(p)	L	6.44
C20N30A	30	-20.6	-21.4	67.0	1820	110	94	10.8	L+S(m) ⁽¹⁶⁾	L+S(m)	L+S(p)	6.47
C20N30B	30	-21.0	-21.6	67.0	1863	135	93	10.8	L+S(m)	L+S(m)	L+S(p)	7.03
C20N40A	40	-21.1	-21.5	67.0	1905	161	92	14.4	n(p)+S(b) ⁽¹⁷⁾	n(p)+S(b)	L+S(p)	8.02
C20N40B	40	-20.8	-21.7	67.0	1905	110	94	14.4	n(p)+S(b)	n(p)+S(b)	L+S(p)	7.56
C20N45A	45	-20.8	-21.2	67.0	2032	186	91	16.2	n(p)+S(b)	n(p)+S(b)	S(m) ⁽¹⁸⁾	9.03
C20N45B	45	-20.7	-21.5	67.0	2032	119	94	16.2	n(b)+S(b) ⁽¹⁹⁾	n(p)+S(b)	S(m)	7.98
C20N50A	50	-20.7	-21.5	67.0	2155	288	87	18	n(b)+S(b)	n(p)+S(b)	S(m)	13.13
C20N50B	50	-21.0	-21.5	67.0	2155	161	93	18	n(b)+S(b)	n(p)+S(b)	S(m)	12.33
MILE064	0	-20.5	-20.9	67.0	1397	216	85		L	L	L	10.77
DRYE080		-20.7	-21.3	67.0								2.89

(1) Fluide tel que reçu contaminé par la neige. La densité de la neige : d = 0,3 g/cm³

(2) D : Pourcentage de dilution en neige.

(3) T_a et (4) T_f : Températures de l'air et du fluide.

(5) Rh : Pourcentage d'humidité relative.

(6) ε(0) : Épaisseur du fluide mesurée après l'application de la neige.

(7) ε(f) : Épaisseur du fluide mesurée après le test d'élimination.

(8) E : Pourcentage d'élimination du fluide.

(9) τ : Temps d'attente incluant le temps pour appliquer la neige.

(10) P0 : État du fluide au cours de l'application de la neige.

(11) P1 : État du fluide après l'application de la neige.

(12) P2 : État du fluide après l'essai d'élimination.

(13) δ* : Valeur moyenne de l'EDCL mesurée entre 27 et 33 secondes.

(14) L : Liquide homogène.

(15) L+S(p) : Liquide+ un peu de «névasse».

(16) L+S(m) : Liquide + «névasse» moyenne.

(17) n(p)+S(b) : un peu de neige + beaucoup de «névasse».

(18) S(m) : «Névasse» moyenne.

(19) n(b)+S(b) : Beaucoup de neige + beaucoup de «névasse».

Annexe G Valeurs mesurées des coefficients de diffusion de l'eau dans le fluide

Tableau G.1 Coefficient de diffusion de l'eau dans le fluide (échantillon I-A)

D %	Température du fluide					
	23 °C			4 °C		
	D _{moyenne}	σn-1	σn-1/D _{moyenne}	D _{moyenne}	σn-1	σn-1/D _{moyenne}
	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	(%)	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	(%)
100	3.41	0.08	2.21	1.00	0.06	5.94
75	4.24	0.17	3.91	1.88	0.10	5.34
50	5.80	0.20	3.53	2.56	0.30	11.57
25	6.44	0.30	4.64	2.96	0.12	4.21

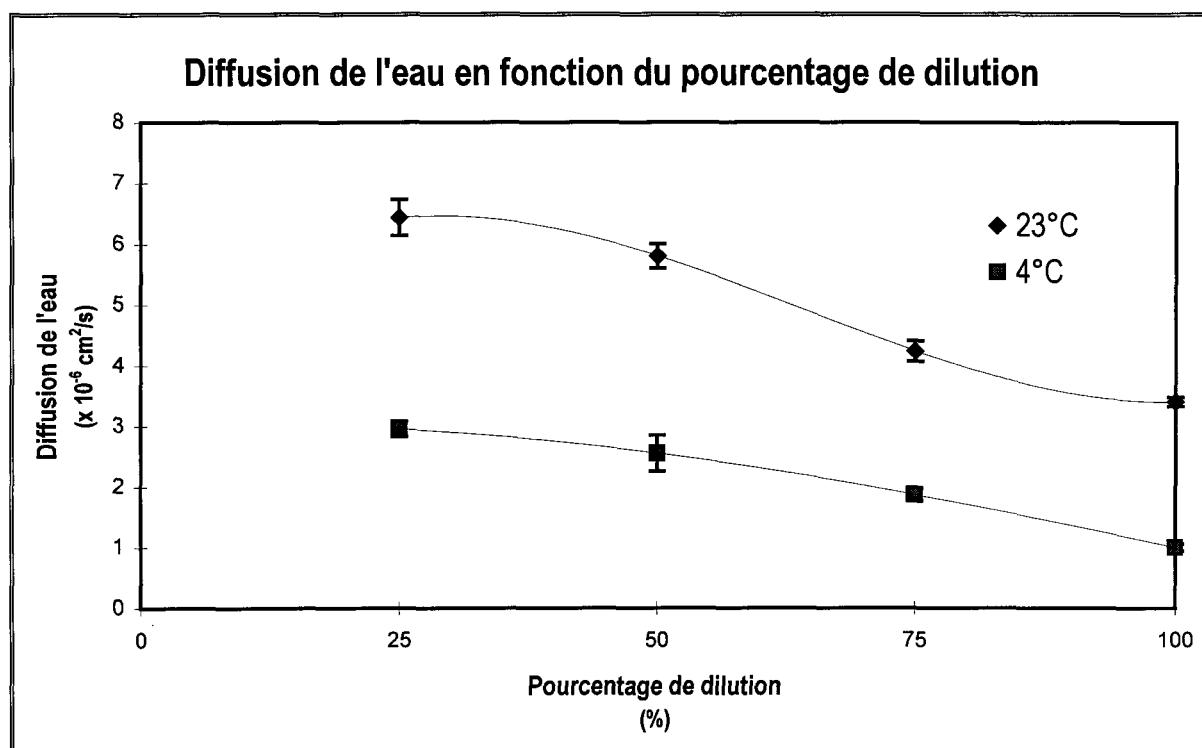


Figure G.1 Diffusion de l'eau en fonction du pourcentage de dilution (échantillon I-A)

Tableau G.2 Coefficient de diffusion de l'eau dans le fluide (échantillon I-B)

D %	Température du fluide					
	23 °C			4 °C		
	D _{moyenne}	σn-1	σn-1/D _{moyenne}	D _{moyenne}	σn-1	σn-1/D _{moyenne}
	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	(%)	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	(%)
100	3.42	0.13	3.90	1.43	0.07	4.88
75	5.28	0.09	1.65	2.11	0.15	7.06
50	5.72	0.26	4.57	2.86	0.26	8.96
25	6.67	0.66	9.92	3.36	0.07	2.05

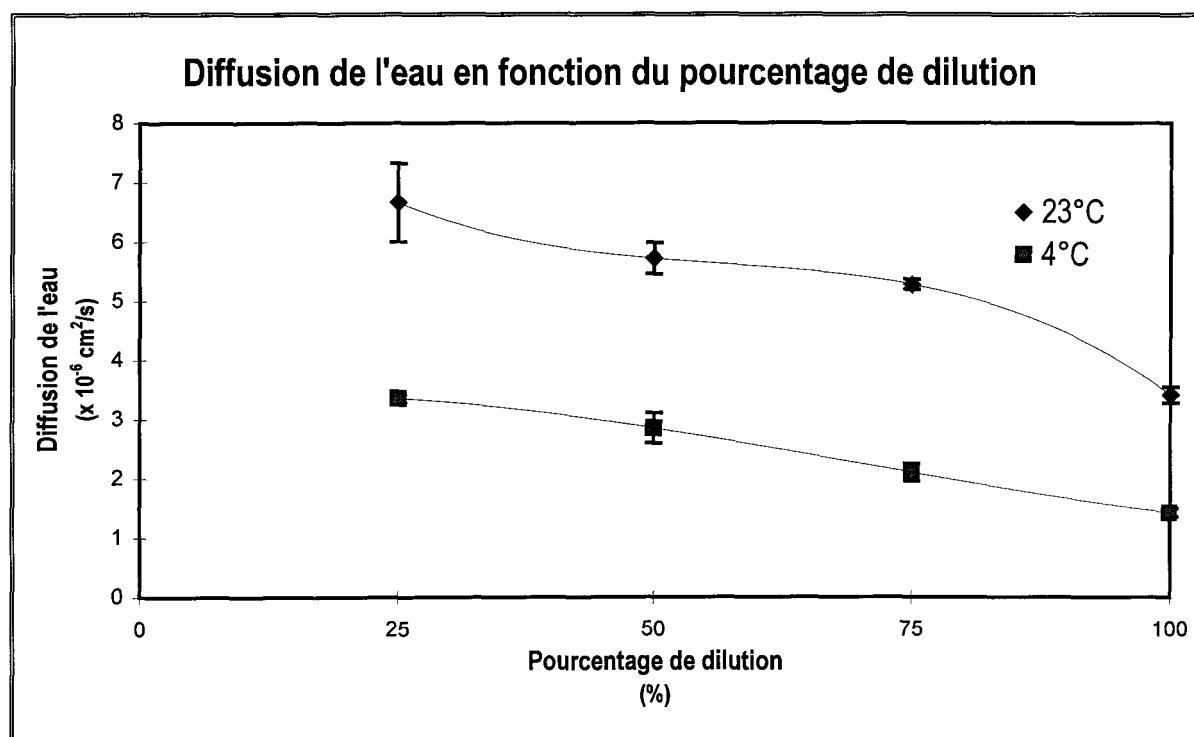


Figure G.2 Diffusion de l'eau en fonction du pourcentage de dilution (échantillon I-B)

Tableau G.3 Coefficient de diffusion de l'eau dans le fluide (échantillon II-C)

D %	Température du fluide					
	23 °C			4 °C		
	D _{moyenne}	σn-1	σn-1/D _{moyenne}	D _{moyenne}	σn-1	σn-1/D _{moyenne}
	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	(%)	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	(%)
100	x	x	x	x	x	x
75	3.02	0.10	3.43	0.98	0.16	16.11
50	4.42	0.20	4.59	1.38	0.00	0.00
25	7.15	0.05	0.67	2.83	0.15	5.16

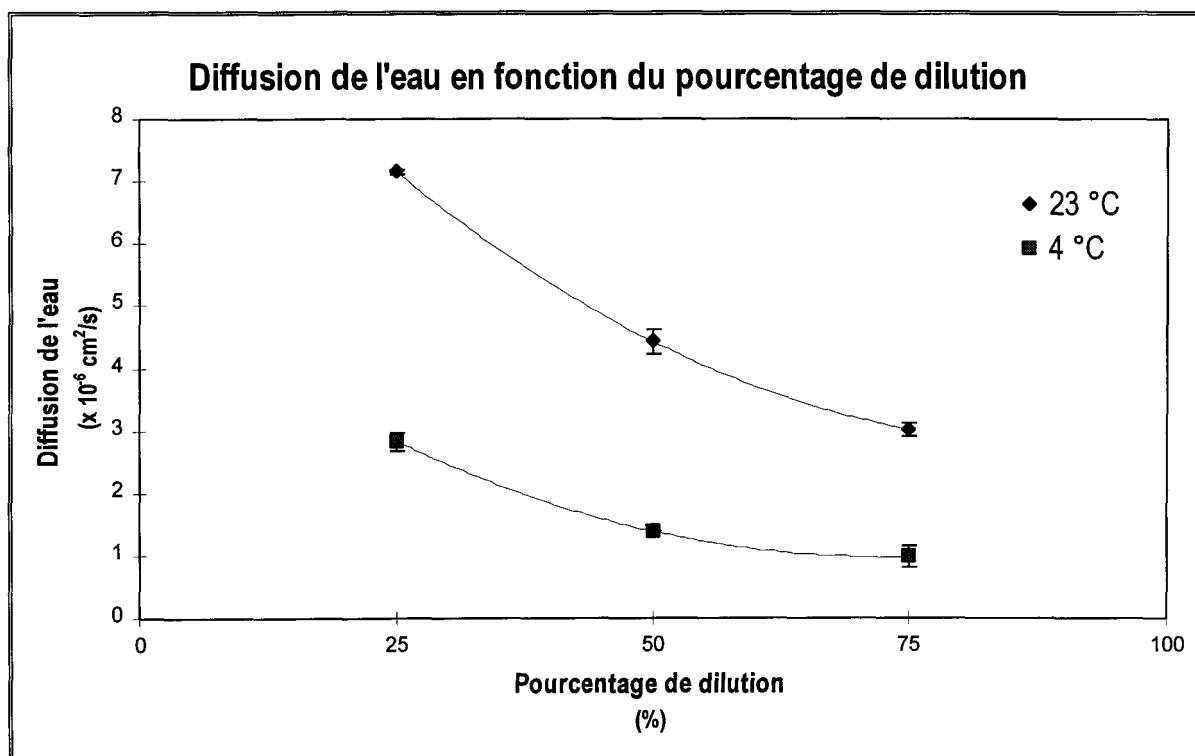


Figure G.3 Diffusion de l'eau en fonction du pourcentage de dilution (échantillon II-C)

Tableau G.4 Coefficient de diffusion de l'eau dans le fluide (échantillon IV-D)

D %	Température du fluide					
	23 °C			4 °C		
	D _{moyenne}	σn-1	σn-1/D _{moyenne}	D _{moyenne}	σn-1	σn-1/D _{moyenne}
	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	(%)	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	(%)
100	5.07	0.44	8.68	2.39	0.27	11.27
75	7.01	0.95	13.60	3.30	0.08	2.28
50	8.00	0.31	3.85	3.53	0.08	2.13
25	7.52	0.22	2.98	3.38	0.13	3.86

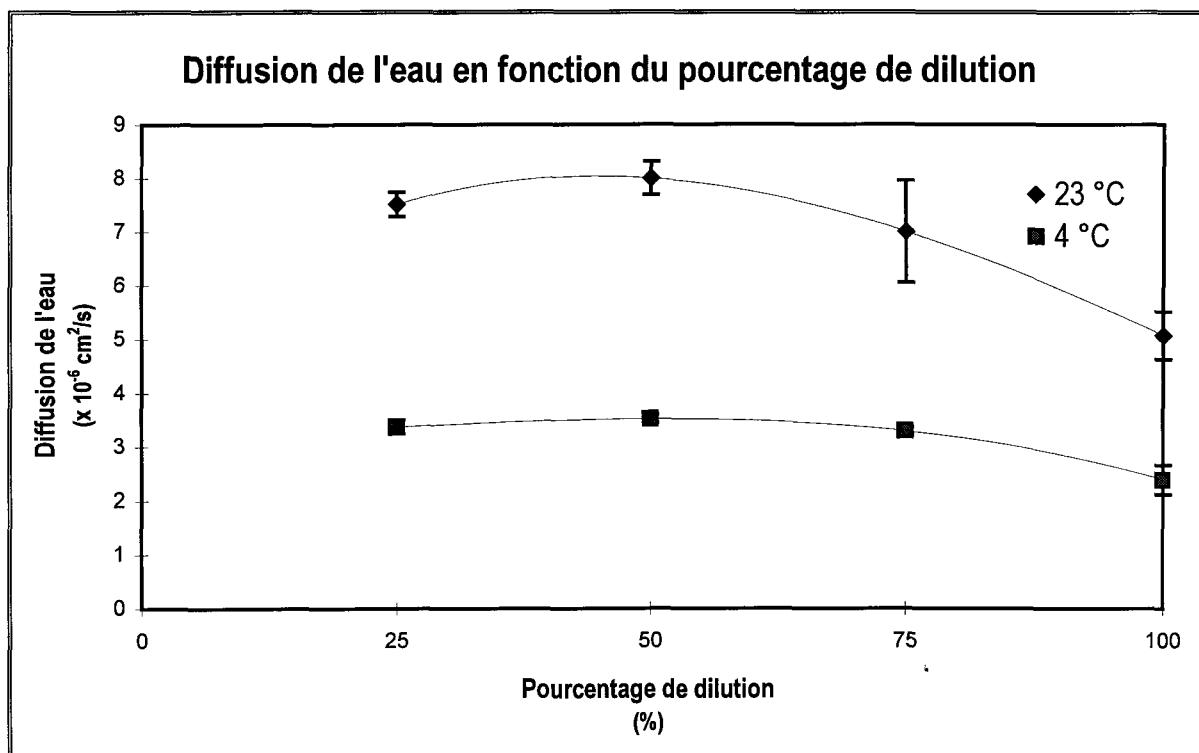


Figure G.4 Diffusion de l'eau en fonction du pourcentage de dilution (échantillon IV-D)

Tableau G.5 Coefficient de diffusion de l'eau dans le fluide (propylène glycol)

D %	Température du fluide					
	23 °C			4 °C		
	D _{moyenne}	σn-1	σn-1/D _{moyenne}	D _{moyenne}	σn-1	σn-1/D _{moyenne}
	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	(%)	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	(%)
100	x	x	x	x	x	x
75	4.17	0.43	10.21	1.18	0.11	8.91
50	4.52	0.19	4.17	1.65	0.15	8.80
25	5.60	0.10	1.73	2.86	0.33	11.67

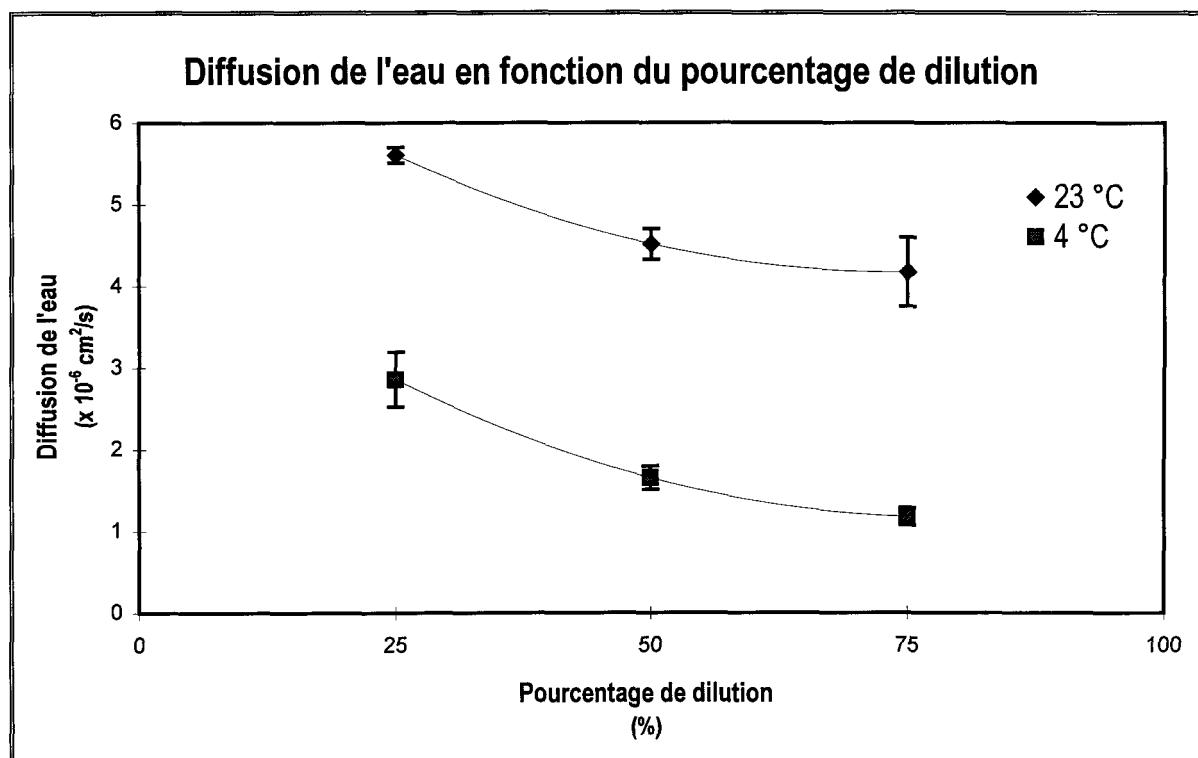


Figure G.5 Diffusion de l'eau en fonction du pourcentage de dilution (échantillon PG)

Tableau G.6 Coefficient de diffusion de l'eau dans le fluide (éthylène glycol)

D %	Température du fluide					
	23 °C			4 °C		
	D _{moyenne}	σn-1	σn-1/D _{moyenne}	D _{moyenne}	σn-1	σn-1/D _{moyenne}
	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	(%)	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	*10 ⁻⁶ (cm ² /s)	(%)
100	3.22	0.07	2.11	1.38	0.11	8.10
75	4.16	0.06	1.38	2.22	0.19	8.72
50	6.00	x	x	3.14	0.38	12.12
25	7.08	0.18	2.52	3.91	0.14	3.58

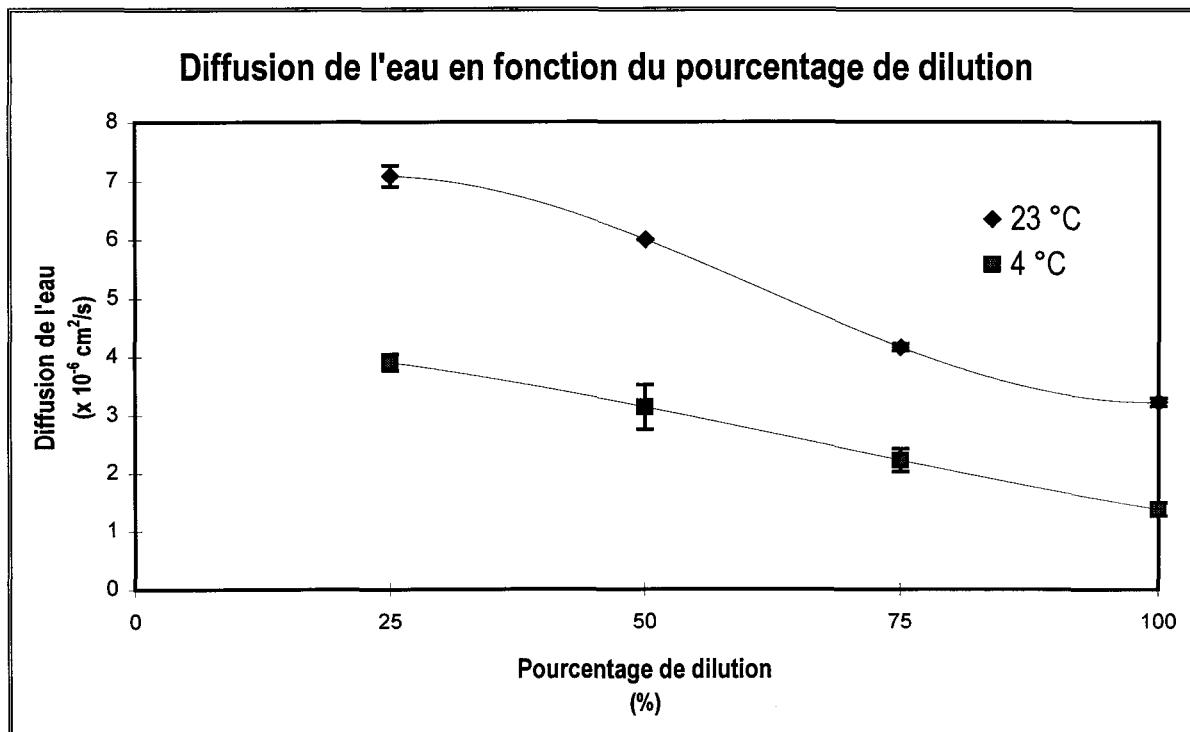


Figure G.6 Diffusion de l'eau en fonction du pourcentage de dilution (échantillon ÉG)