

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

ÉVALUATION DES PARAMÈTRES INFLUENÇANT LE TEMPS D'ENDURANCE
D'UN FLUIDE ANTIGIVRE SOUS PRÉCIPITATIONS DE NEIGE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU PROGRAMME DE MAÎTRISE EN INGÉNIERIE
POUR L'OBTENTION DU GRADE DE
MAÎTRE EN SCIENCES APPLIQUÉES
(M. Sc. A.)

PAR

ILHAM ENNAJI

MAI 2011

RÉSUMÉ

L'accumulation de neige et de givre sur les surfaces critiques des avions au sol ou en attente de décollage telles que les ailes, les gouvernes et les bords d'attaque altère leur surface, conduisant à des pertes de performances aérodynamiques lors du décollage qui, dans certains cas, se sont avérées néfastes. Pour éviter ce type d'accidents lors du décollage, des méthodes de dégivrage et de protection antigivre ont été développées. Les fluides antigivre et dégivrants appliqués sur les surfaces critiques des avions en attente de décollage sont parmi les méthodes les plus utilisées pour prévenir la formation de la neige ou encore pour la faire fondre.

Les fluides qui sont à base de glycol sont caractérisés par leur temps de protection, communément appelé temps d'endurance, qui est mesuré à partir d'une évaluation effectuée en chambre climatique selon la norme ARP5485. Le temps d'endurance est déterminé en exposant une plaque, recouverte d'un fluide antigivre, à des précipitations de neige artificielle sous 0 °C.

Le but de ce mémoire est de comprendre le comportement du fluide antigivre durant l'essai d'endurance à la neige, de déterminer les paramètres influençant l'échec du fluide, et d'élaborer un mécanisme expliquant l'échec du fluide.

Le montage expérimental défini dans la norme a été modifié afin de simplifier les phénomènes en jeu. Le montage expérimental utilisé durant les essais qui ont été effectués dans la chambre climatique de 9 m du LIMA consiste à une plaque plane en aluminium de 50 cm de longueur par 30 cm de largeur et d'une boîte à neige en aluminium munie d'un cylindre en acétal avec des trous demi-sphériques permettant à la neige de tomber sous forme de groupes selon deux intensités de 10 et 25 g/dm²/h. La plaque est parallèle au sol et entourée de parois isolées permettant aux précipitations de neige de s'accumuler et d'empêcher l'écoulement du fluide. Un élément chauffant situé sous la plaque permet de maintenir sa température à la valeur déterminée par la norme et deux thermocouples positionnés à l'interface plaque/élément chauffant permettent de mesurer et contrôler sa température. Un autre thermocouple est ajouté afin de mesurer la température du fluide durant l'essai. La chambre climatique est contrôlée par un automate afin de maintenir sa température au niveau désiré qui est de -5 °C, -10 °C, -14 °C, -25 °C. Le montage est relié à un automate qui maintient la température de la plaque à la valeur désirée en gérant l'énergie fournie à la plaque. L'automate et le montage sont reliés à un ordinateur, dans lequel un programme informatique permet l'enregistrement des températures de l'air, de la plaque et du fluide, de l'intensité des précipitations et de la masse de neige précipitée durant l'essai ainsi que de la puissance consommée. Les essais ont été effectués avec un fluide générique à base de propylène glycol; durant chaque essai, une quantité de 400 ml de fluide est versée sur la plaque, ce qui forme une couche d'épaisseur de 2,7 mm.

Les résultats ont montré que la température de l'air demeure constante avec de petites fluctuations régulières tout au long de l'essai pour toutes les conditions. Pour les essais effectués à une température supérieure à $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, la température de la plaque débute à peu près à la valeur désirée et décroît rapidement à une valeur minimale. La diminution de température est compensée par une augmentation de puissance pour la ramener à la valeur désirée; par la suite, la puissance décroît vers une valeur nulle. Pour les essais réalisés à une température de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, la température de la plaque reste presque constante et aucune puissance n'est impliquée. La masse de neige qui induit l'échec ainsi que la puissance moyenne fournie à la plaque et le temps d'endurance du fluide diminuent exponentiellement avec la baisse de la température. La masse de neige est indépendante de la grosseur des trous et peu dépendante de l'intensité. Par contre, la puissance moyenne et le temps d'endurance sont indépendants de la grosseur des trous, mais ils sont dépendants de l'intensité de précipitation. Les observations visuelles effectuées durant les essais ont montré que seulement une fraction de la neige fond et se diffuse dans le fluide, l'autre fraction s'accumule dans le fluide. Les cristaux de glace qui s'accumulent dans le fluide forment aussi une 'slush' épaisse et uniforme à l'échec.

En raison de la neige qui s'accumule dans le fluide, de nombreux sites de diffusion sont présents à l'intérieur de celui-ci, permettant de conclure que la diffusion de l'eau est homogène et s'effectue presque instantanément dans le fluide. L'absorption de l'eau et de la neige décroît la concentration en propylène glycol du fluide et cette concentration diminue avec l'augmentation de la température. Par contre, le fluide n'est en mesure d'absorber qu'une certaine quantité d'eau, car l'énergie consommée n'est qu'une fraction de l'énergie disponible et que cette quantité dépend de la température de l'air. Cette diminution de concentration accroît la température de solidification du fluide. Lorsque la température de solidification est calculée à partir de la concentration d'eau liquide et solide excluant le 30 % de neige accumulée à l'échec, celle-ci est égale à la température de l'air.

Les résultats issus de ce travail ont permis d'élucider certains aspects liés aux essais d'endurance de neige. L'échec débute lorsque la température de solidification du fluide est égale à la température de l'air. À ce moment, le fluide n'est plus en mesure d'absorber de l'eau, la neige ne fond plus, mais s'accumule dans le fluide pour former une 'slush' qui s'épaissit avec le temps. Lorsque le fluide est saturé d'eau et de particules solides, la neige s'accumule sur la surface. Lorsque la surface est recouverte de 30 % de neige, l'échec est déclaré. Cependant, d'autres travaux sont requis afin de produire un modèle numérique pour prédire l'échec : (1) Réaliser les mêmes essais avec les fluides utilisés en industrie et comparer les résultats avec ceux du fluide générique. (2) réaliser des essais avec une plaque plane inclinée à 10° . Vérifier si les mêmes paramètres sont impliqués et vérifier l'effet de la viscosité du fluide.

ABSTRACT

Snow and ice accumulation can change the shape of critical aeroplane surfaces, while on the tarmac or waiting for take-off, such as wings, flight control surfaces and leading edges. This can lead to a loss of aerodynamic performance during take-off, which may at times prove to be dangerous. De-icing and anti-icing protection methods have been developed to avoid such accidents during take-off. Anti-icing and de-icing fluids applied to an aeroplane's critical surfaces while waiting for take-off are among the most used techniques used to prevent snow accumulation or to make it melt.

Glycol based fluids are characterised by their protection time, commonly called endurance time, which is determined based on an evaluation carried out in an environmental test chamber, according to standard APR5485. Endurance time is measured by exposing an anti-icing fluid covered plate to a snowfall below 0°C.

The purpose of this thesis is to understand the behaviour of the anti-icing fluid during snow endurance tests, to determine the parameters influencing the failure of the fluid and to determine the mechanism of fluid failure.

The experimental setup defined in the standard was modified to simplify the phenomena under study. The experimental setup used during the tests carried out in LIMA's 9m environmental test chamber consisted of a flat, 50cm long and 30cm wide aluminum plate and an aluminum snow box equipped with an acetal cylinder. The cylinder contains hemispherical holes allowing the snowflakes to fall in groups with two intensities, 10 and 25 g/dm²/h. The plate is parallel to the ground, surrounded by insulated walls allowing the snow to accumulate and preventing the fluid from escaping. A heating element under the plate maintains its temperature at the value defined by the standard and two thermocouples located at the plate/heating element interface measures and controls the temperature. Another thermocouple is used to measure the temperature of the fluid during the experiment. The temperature control in the climate chamber is automated to maintain the temperature at the required levels of -5°C, -10°C, -14°C, and -25°C. The assembly is linked to a controller that maintains the plate temperature at the desired level by controlling its power supply. The controller and the assembly are linked to a computer, which automatically records the air, plate and fluid temperatures, the precipitation intensity and the weight of the snow precipitated during the test, as well as the power consumption. Experimental runs were performed using a generic fluid containing propylene glycol. 400 ml of fluid was poured on the plate during each run, forming a 2.7 mm thick layer.

Results have shown that the air temperature remains constant with small, regular fluctuations throughout the run for all conditions. For runs at temperatures higher than -25°C, the plate temperature is at approximately the desired temperature at the beginning of

the test and decreases rapidly to a minimum value. The lowering of the temperature is compensated for by an increase in power to bring it back to the desired level; subsequently, power decreases towards zero. For experiments at -25°C , the temperature of the plate remains almost constant and no power is used. The weight of snow leading to failure as well as the average power supplied to the plate and the endurance time of the fluid diminish exponentially with a decrease in temperature. On the other hand, the weight of the snow is independent of the size of the holes and slightly dependent on the snow precipitation intensity. Visual observations carried out during the runs have shown that only a fraction of the snow melts, diffusing into the fluid, the rest accumulates in the fluid. Ice crystals accumulating in the fluid form a thick and uniform slush until failure.

Because of the snow accumulating in the fluid, a number of diffusion sites are present within it, leading to the conclusion that the diffusion of water into the fluid is homogenous and almost instantaneous. The absorption of water and snow decreases the concentration of propylene glycol in the fluid and this concentration diminishes with increasing temperature. However, the fluid can only absorb a certain quantity of water because the energy used is only a fraction of the available energy and this quantity depends on air temperature. This decrease in temperature increases the temperature of solidification of the fluid. When the temperature of solidification is calculated from the concentration of liquid and solid water, excluding the 30% of snow accumulated at failure, it is equal to the air temperature.

The results of this work have helped to clarify certain aspects of snow endurance tests. Failure begins as soon as the fluid's temperature of solidification is equal to the air temperature. At that time, the fluid cannot absorb any more water, the snow does not continue to melt, but accumulates in the fluid to form a slush, thickening with time. When the fluid is saturated with water and solid particles, the snow accumulates on the surface. Failure is declared when 30% of the surface is covered in snow. However, further work is needed to create a numerical model of the failure: (1) repeat the same experiments with fluids used in industry and compare the results with the generic fluid results. (2) Repeat the experiments with the flat plate inclined at 10° . Check if the same parameters are involved and verify the effect of fluid viscosity.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier et à témoigner ma gratitude à mon directeur de recherche, monsieur Jean Perron, professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) et directeur du Laboratoire international des matériaux antigivre (LIMA), pour avoir dirigé mes travaux et pour m'avoir donné de judicieux conseils. Je lui suis reconnaissante d'avoir accepté de m'accueillir au sein de son laboratoire de recherche, de la confiance et du soutien qu'il m'a témoignés au cours de la réalisation de ce travail.

Je suis aussi reconnaissante envers monsieur Guy Fortin, professeur associé au département des sciences appliquées à l'UQAC et chercheur au sein du LIMA, de m'avoir permis de mener à bien ce travail. Je le remercie pour son aide précieuse dans l'amélioration du montage expérimental, l'analyse et la compréhension des résultats, pour ses remarques pertinentes, ses conseils pratiques, pour son entière disponibilité et particulièrement pour avoir corrigé mon mémoire. Ses connaissances m'ont été profitables.

J'adresse également mes remerciements à madame Arlène Beisswenger, gestionnaire du laboratoire, pour ses suggestions imprégnées d'expérience et son aide pour ma recherche littéraire.

Mes remerciements s'adressent également à madame Nathalie Gagné, assistante de recherche au LIMA, pour m'avoir aidée à démarrer mes essais.

Je remercie aussi messieurs Carol Mercier et Martin Truchon, techniciens de laboratoire, pour leur soutien technique lors de la réalisation du montage et des essais.

Merci à madame Elizabeth Crook, pour ses corrections.

Merci également à mes collègues, les étudiants du laboratoire, Jean-Denis Brassard, Maryelle Adomou, Derek Harvey, Amine Noui, Mohammed Boussetoua, Éric Villeneuve et Gaétan Gouez.

J'adresse mes remerciements également à tout le personnel du LIMA et de l'UQAC.

Une pensée particulière va à tous mes amis qui sont entrés dans ma vie durant mon parcours que ce soit au Maroc ou au Canada, et qui le sont demeurés pour le rendre si agréable. Je pense particulièrement à Karima Boufaras, Hadia Zeroual, Imane Assiade, Ihsane Otmani, Sofia Tounsi, Kaoutar Azami, Lamia Bezzaze. Je vous remercie pour tous les instants inoubliables que j'ai passés avec vous. Un merci spécial à Kiki.

Un grand merci du fond du cœur pour une personne très spéciale, ma source de chaleur dans ce pays froid, ma famille là où je n'ai pas de famille, et sa famille pour leur accueil, leur hospitalité et leur gentillesse, surtout pendant les premiers mois de mon arrivée au Québec où je ne connaissais personne. Encore une fois, mille mercis à Fouzia El abeid. Nul mot ne pourrait exprimer ma reconnaissance et ma gratitude envers lui.

Je ne voudrais pas manquer d'exprimer ma reconnaissance et ma gratitude à mes chères sœurs, Nadia et Sarah, pour leur présence, leur amour et pour nos rendez-vous chaque jour à 4 h. Merci d'être à la fois mes sœurs et mes amies.

Finalement j'adresse mes plus grands remerciements à mes parents pour leur présence, leur immense amour, leur affection inépuisable, leur confiance et leurs encouragements. Je vous dois tout le respect et la reconnaissance du monde.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	ii
Abstract.....	iv
Remerciements.....	vi
Table des matières	viii
Liste des figures	x
Liste des tableaux.....	xvii
Liste des symboles.....	xx
Liste des abréviations.....	xxii
Chapitre I Introduction.....	1
1.1 État des connaissances	2
1.1.1 L'effet du givre sur les avions	2
1.1.2 Givrage.....	3
1.1.3 Dégivrage et antigivrage des avions	7
1.1.4 Temps d'endurance.....	12
1.1.5 Homologation des fluides dégivrants et antigivre	12
1.2 Revue de littérature sur les essais de neige	21
1.3 Problématique	25
1.4 Objectifs	26
1.4.1 Objectif principal	26
1.4.2 Objectifs secondaires	26
1.5 Méthodologie	27
1.6 Plan de travail.....	28
Chapitre II Expérimentation	30
2.1 Description de l'essai	31
2.2 Description du montage	34
2.3 Préparation de neige.....	37
2.4 Fluide antigivre générique.....	38
2.4.1 Propriétés du propylène glycol	39
2.5 Procédure expérimentale.....	40
2.5.1 Mesure de la concentration volumique en propylène glycol	45
2.6 Conditions expérimentales.....	47
Chapitre III Résultats expérimentaux	49
3.1 Évolution des précipitations durant un essai	51
3.2 Essais principaux.....	54
3.2.1 Intensité de 10 g/dm ² /h	54
3.2.2 Intensité de 25 g/dm ² /h	73
3.3 Essais complémentaires	91
3.3.1 Intensité de 10 g/dm ² /h	92
3.3.2 Intensité de 25 g/dm ² /h	107
Chapitre IV Interprétation des résultats	121
4.1 Essais réalisés.....	122

4.2	Reproductibilité des essais	124
4.2.1	Intensité de 10 g/dm ² /h	124
4.2.2	Intensité de 25 g/dm ² /h	130
4.2.3	Répétitivité.....	136
4.3	Analyse des résultats	137
4.3.1	Intensité moyenne de neige durant les essais.....	137
4.3.2	Évaluation du fluide.....	138
4.3.3	Puissance et énergie moyennes fournies durant l'essai	144
4.3.4	Température de solidification finale du fluide.....	146
4.3.5	Temps d'endurance pour chaque essai	148
4.3.6	Le nombre adimensionnel ISTDN	148
Chapitre V	Description du processus.....	150
5.1	Explication du phénomène.....	151
5.2	Fraction liquide	154
5.3	La diffusivité.....	155
Chapitre VI	Conclusions et Recommandations	160
6.1	Conclusions.....	161
6.2	Recommandations.....	164
Annexe A	Résultats expérimentaux des essais principaux.....	168
Annexe B	Résultats expérimentaux des essais complémentaires.....	194
Annexe C	Calcul de la diffusivité.....	206

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Modification du profil et de la rugosité de la pale due à l'accrétion de glace.....	3
Figure 2 : Formation de givre sur un modèle réduit de pale d'hélicoptère.....	5
Figure 3 : Formation de verglas sur un modèle réduit de pale d'hélicoptère	5
Figure 4 : Système de dégivrage pneumatique	9
Figure 5 : Dégivrage d'une aile d'avion avec un racloir (moyen mécanique)	10
Figure 6 : Dégivrage avec un fluide de type I appliqué sous pression	11
Figure 7 : Exemple de fluides dégivrants et antigivre	14
Figure 8 : Procédure de déclaration de l'échec.....	22
Figure 9 : Température de l'air et de la plaque enregistrée durant un essai (LIMA 2004), [22].....	25
Figure 10 : Montage expérimental pour les essais d'endurance de neige selon la norme ARP 5485.....	32
Figure 11 : Montage expérimental utilisé pour les essais d'endurance de neige	33
Figure 12 : Plaque d'essai recouverte par un élément chauffant	34
Figure 13 : Système de distribution de neige.....	35
Figure 14 : Coupe transversale de la boîte à neige	35
Figure 15 : a) Vue de l'extérieur de la boîte à neige b) Vue de l'intérieur de la boîte à neige	36
Figure 16 : Systèmes d'acquisition des données et de contrôle des essais.....	37
Figure 17 : Ramassage de la neige artificielle	38
Figure 18 : Programme de contrôle de la boîte à neige	41
Figure 19 : Réfractomètre numérique MISCO Palm Abbe N°: PA-202X	46
Figure 20 : Concentration de propylène glycol en fonction de l'indice de réfraction	47
Figure 21 : Photo de l'évolution de l'absorption de neige par le fluide durant l'essai.....	52
Figure 22 : Photo de l'évolution de l'absorption de neige par le fluide	52
Figure 23 : Photo de l'évolution de l'absorption de neige par le fluide	53
Figure 24 : Photo de l'évolution de l'absorption de neige par le fluide lors de l'échec	54
Figure 25 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 1 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL071	56

Figure 26 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 1 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL071	57
Figure 27 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 1 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL077.....	59
Figure 29 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 2 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL060.....	61
Figure 30 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 2 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL060	62
Figure 31 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 2 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL058.....	63
Figure 32 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 2 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL058	64
Figure 33 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 3 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL069.....	66
Figure 34 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 3 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL069	67
Figure 35 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 3 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL067.....	68
Figure 36 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 3 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL067	69
Figure 37 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 4 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL047.....	70
Figure 38 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 4 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL047	71
Figure 39 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 4 avec une boîte à neige à gros trous, SNWIL049	72
Figure 40 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 4 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL049	73
Figure 41 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 5 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL072.....	75
Figure 42 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 5 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL072	76
Figure 43 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 5 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL075.....	77
Figure 44 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 5 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL075	78

Figure 45 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 6 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL042	79
Figure 46 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 6 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL042	81
Figure 47 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 6 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL061	82
Figure 48 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 6 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL061	83
Figure 49 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 7 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL065	84
Figure 50 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 7 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL065	85
Figure 51 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 7 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL064	86
Figure 52 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 7 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL064	87
Figure 53 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 8 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL056	88
Figure 54 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 8 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL056	89
Figure 55 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 8 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL057	90
Figure 56 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 8 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL057	91
Figure 57 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL090	93
Figure 58 : Évolution de l'intensité des précipitations et de la masse de neige dans le temps pour l'essai SNWIL090	94
Figure 59 : Photos de l'évolution de l'absorption de neige par le fluide prises durant l'essai	95
Figure 60 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL102	96
Figure 61 : Évolution de l'intensité des précipitations et de la masse de neige dans le temps pour l'essai SNWIL102	98
Figure 62 : Photos de l'évolution de l'absorption de neige par le fluide prises durant l'essai	99

Figure 63 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL109.....	100
Figure 64 : Évolution de l'intensité des précipitations et de la masse de neige dans le temps pour l'essai SNWIL109	101
Figure 65 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL106.....	104
Figure 66 : Évolution de l'intensité des précipitations et de la masse de neige dans le temps pour l'essai SNWIL106	106
Figure 67 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL095.....	108
Figure 68 : Évolution de l'intensité des précipitations et de la masse de neige dans le temps pour l'essai SNWIL095	110
Figure 69 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL104.....	111
Figure 70 : Évolution de l'intensité des précipitations et de la masse de neige dans le temps pour l'essai SNWIL104	113
Figure 71 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL099.....	115
Figure 72 : Évolution de l'intensité des précipitations et de la masse de neige dans le temps pour l'essai SNWIL099	116
Figure 73 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL107.....	118
Figure 74 : Évolution de l'intensité et de la masse de neige précipitée en fonction du temps pour l'essai SNWIL107	119
Figure 75 : Intensité moyenne enregistrée durant les essais.....	138
Figure 76 : Masse de neige accumulée dans le fluide en fonction du temps pour les essais à 10 g/dm ² /h.....	139
Figure 77 : Masse de neige accumulée dans le fluide en fonction du temps pour les essais à 25 g/dm ² /h.....	140
Figure 78 : Masse de neige accumulée en fonction de la température de l'air mesurée	141
Figure 79 : Épaisseur finale de neige qui tombe sur le fluide.....	142
Figure 80 : Concentration finale en propylène glycol dans le fluide.....	143
Figure 81 : Puissance moyenne fournie à la plaque.....	145
Figure 82 : Énergie moyenne fournie à la plaque	146
Figure 83 : Température de solidification finale du fluide	147

Figure 84 : Temps d'endurance pour les différents essais.....	148
Figure 85 : Nombre adimensionnel ISTDN pour les différents essais	149
Figure 86 : Aspect que prend la neige précipitée sur le fluide (slush) après 23 minutes ...	153
Figure 87 : Aspect que prend la neige précipitée sur le fluide	153
Figure 88 : Aspect que prend la neige précipitée à l'échec du fluide après 97 minutes.....	154
Figure 89 : Fraction liquide en fonction de la température de l'air mesurée.....	155
Figure 90 : Concentration finale en propylène glycol en tenant compte de la fraction liquide	157
Figure 91 : Température de solidification finale du fluide en tenant compte de la fraction liquide	158
Figure A-1 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 1 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL079.....	170
Figure A-2 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 1 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL079	171
Figure A-3 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 1 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL084.....	172
Figure A-4 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 1 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL084.....	172
Figure A-5 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 2 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL062.....	174
Figure A-7 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 2 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL059.....	175
Figure A-8 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 2 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL059.....	176
Figure A-9 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 4 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL048.....	177
Figure A-10 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 4 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL048	178
Figure A-11 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 4 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL046.....	179
Figure A-12 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 4 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL046.....	179
Figure A-13 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 5 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL080.....	181

Figure A-14 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 5 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL080	181
Figure A-15 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 5 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL081	182
Figure A-16 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 5 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL081	183
Figure A-17 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 6 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL041	184
Figure A-18 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 6 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL041	185
Figure A-19 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 6 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL063	186
Figure A-20 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 6 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL063	186
Figure A-21 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 7 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL039	188
Figure A-23 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 7 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL066	189
Figure A-24 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 7 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL066	190
Figure A-25 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 8 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL054	191
Figure A-26 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 8 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL054	192
Figure A-27 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 8 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL050	193
Figure A-28 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 8 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL050	193
Figure B-1 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL092	196
Figure B-2 : Évolution de l'intensité et de la masse des précipitations de neige dans le temps pour l'essai SNWIL092	197
Figure B-3 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL103	198
Figure B-4 : Évolution de l'intensité et de la masse des précipitations de neige dans le temps pour l'essai SNWIL103	198

Figure B-5 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL096.....	200
Figure B-6 : Évolution de l'intensité et de la masse des précipitations de neige dans le temps pour l'essai SNWIL096.....	201
Figure B-7 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL105.....	202
Figure B-8 : Évolution de l'intensité et de la masse des précipitations de neige dans le temps pour l'essai SNWIL105.....	202
Figure B-9 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL098.....	203
Figure B-10 : Évolution de l'intensité et de la masse des précipitations de neige dans le temps pour l'essai SNWIL098.....	204
Figure B-11 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL108.....	205
Figure B-12 : Évolution de l'intensité et de la masse des précipitations de neige dans le temps pour l'essai SNWIL108.....	205

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Couleur de chaque type de fluide	14
Tableau 2 : Coefficients utilisés dans les équations de propriétés de propylène glycol	40
Tableau 3 : Conditions expérimentales.....	48
Tableau 4 : Concentration et température de solidification expérimentale et calculée de propylène glycol durant l'essai	99
Tableau 5 : Concentration et température de solidification expérimentale et calculée de propylène glycol durant l'essai	103
Tableau 6 : Concentration et température de solidification expérimentale et calculée de propylène glycol durant l'essai	106
Tableau 7 : Concentration et température de solidification expérimentale et calculée de propylène glycol durant l'essai	114
Tableau 8 : Concentration et température de solidification expérimentale et calculée de propylène glycol durant l'essai	120
Tableau 9 : Résultats expérimentaux pour 47 essais	123
Tableau 10 : Résultat pour la condition 1 avec un cylindre à petits trous	125
Tableau 11 : Résultat pour la condition 1 avec un cylindre à gros trous.....	125
Tableau 12 : Résultat pour la condition 2 avec un cylindre à petits trous	126
Tableau 13 : Résultat pour la condition 2 avec un cylindre à gros trous.....	127
Tableau 14 : Résultat pour la condition 3 avec un cylindre à petits trous	128
Tableau 15 : Résultat pour la condition 4 avec un cylindre à petits trous	129
Tableau 16 : Résultat pour la condition 4 avec un cylindre à gros trous.....	129
Tableau 17 : Résultat pour la condition 5 avec un cylindre à petits trous	130
Tableau 18 : Résultat pour la condition 5 avec un cylindre à gros trous.....	131
Tableau 19 : Résultat pour la condition 6 avec un cylindre à petits trous	132
Tableau 20 : Résultat pour la condition 6 avec un cylindre à gros trous.....	132
Tableau 21 : Tableau récapitulatif d'essais effectués avec la condition 7.....	133
Tableau 22 : Résultat pour la condition 7 avec un cylindre à gros trous.....	134
Tableau 23 : Résultat pour la condition 8 avec un cylindre à petits trous	135
Tableau 24 : Résultat pour la condition 8 avec un cylindre à gros trous.....	136

Tableau A-1 : Conditions expérimentales	169
Tableau A-2 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL079 avec un cylindre à petits trous	170
Tableau A-3 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL084 avec un cylindre à gros trous	171
Tableau A-4 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL062 avec un cylindre à petits trous	173
Tableau A-5 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL059 avec un cylindre à gros trous	175
Tableau A-6 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL048 avec un cylindre à petits trous	177
Tableau A-7 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL046 avec un cylindre à gros trous	178
Tableau A-8 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL080 avec un cylindre à petits trous	180
Tableau A-9 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL081 avec un cylindre à gros trous	182
Tableau A-10 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL041 avec un cylindre à petits trous	184
Tableau A-11 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL063 avec un cylindre à gros trous	185
Tableau A-12 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL039 avec un cylindre à petits trous	187
Tableau A-13 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL066 avec un cylindre à gros trous	189
Tableau A-14 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL054 avec un cylindre à petits trous	191
Tableau A-15 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL050 avec un cylindre à gros trous	192
Tableau B-1 : Conditions expérimentales.....	195
Tableau B-2 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL092.....	196
Tableau B-3 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL103.....	197
Tableau B-4 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL096.....	200
Tableau B-5 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL105.....	201
Tableau B-6 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL098.....	203

Tableau B-7 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL108.....	204
Tableau C-1 : Coefficient de diffusion pour les différentes températures.....	208

LISTE DES SYMBOLES

A_{plaque}	Surface de la plaque	dm^2
A	Constante	m^2/s
B	Constante	K
C_{glycol}	Concentration en propylène glycol	
C_{water}	Concentration d'eau dans le fluide	
D	Coefficient de diffusion	m^2/s
E_{fournie}	Énergie fournie par le système de chauffage	J
E_{snow}	Énergie contenue dans la neige	J
I	Intensité des précipitations de neige avec laquelle l'essai est réalisé	$\text{g}/\text{dm}^2/\text{h}$
L_f	Chaleur latente de fusion	kJ/kg
M_{eau}	Masse initiale de l'eau	kg
m_{fluid}	Masse de fluide	g
M_{glycol}	Masse initiale de glycol	kg
M_{neige}	Masse de neige qui tombe sur la plaque	kg
M_{plein}	Masse du contenant plein	g
m_{snow}	Masse de neige	g
m_{snow}	Masse de neige précipitée durant l'essai	kg
M_{vide}	Masse du contenant vide	g
P_{fournie}	Puissance fournie au système	W
T	Température	K
t	Durée de l'essai (temps d'endurance)	s
T_{Air}	Température de l'air	$^{\circ}\text{C}$
T_f	Température de solidification du fluide	K
T_{plaque}	Température de la plaque	$^{\circ}\text{C}$
V_{fluid}	Volume de fluide	m^3
Volume	Volume du contenant	cm^3
ρ	Densité de la neige	g/cm^3
ρ_{eau}	Densité initiale de l'eau	kg/m^3

ρ_{glycol}	Densité du glycol	kg/m^3
ρ_{neige}	Densité de la neige	kg/m^3
ρ_{water}	Densité de l'eau	g/m^3

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AMS	Aerospace Material Specification.
ARP5485	Aerospace Recommended Practice.
BDLT	Épaisseur de déplacement de la couche limite. (Boundary Layer Displacement Thickness).
C	Concentration.
DVM	Diamètre médian volumique.
FAA	Federal Aviation Administration.
FRST	Essais de gelée (Frost Test).
FZDZ	Essais de bruine verglaçante (Freezing Drizzle test).
FZFG	Essais de brouillard givrant (Freezing Fog test).
FZRA	Essais de la pluie verglaçante (Freezing Rain).
HHET	Essais d'endurance à l'humidité extrême (High Humidity Endurance Test).
LIMA	Laboratoire international des matériaux antigivre.
LOUT	Température minimale d'utilisation opérationnelle (Lowest Operational Usage).
NCAR	National Center for Atmospheric Research.
RCSW	Essais avec une boîte surrefroïdie (Rain on a Cold-Soaked Wing).
SAE	Society of Automotive Engineers.
SNW	Essai de neige (Snow test).
T-Solidif	Température de solidification.
UQAC	Université du Québec à Chicoutimi.
WSET	Essais d'endurance à l'eau pulvérisée (Water Spray Endurance Test).

CHAPITRE I
INTRODUCTION

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1 État des connaissances

1.1.1 L'effet du givre sur les avions

Les avions sont certifiés pour voler avec des surfaces propres et sèches. En général, ils ne sont pas supposés voler en présence de contamination sur la voilure et les gouvernes. La contamination se produit lorsque quelque chose adhère à la surface d'une partie critique, ce qui modifie son profil aérodynamique. Il existe de nombreux contaminants potentiels, comme le givre, la neige, la glace, la pluie, les insectes écrasés, les fientes d'oiseaux, l'huile hydraulique, les fluides antigivre, etc.

La présence de contaminants givrants sur les surfaces, même dans le cas de minces couches, est nuisible, car la rugosité de la surface augmente significativement. Or, cette rugosité a un gros impact sur les avions, car elle perturbe l'écoulement de l'air autour du profil aérodynamique (**Figure 1**) et réduit leur performance [1].

La rugosité, en affectant l'écoulement, modifie localement le gradient de pression de la couche limite, ce qui peut la rendre turbulente ou la faire décoller de la surface. Une couche limite turbulente est une bonne chose, car elle est plus épaisse et moins sensible aux défauts de surface susceptibles de causer le décollement d'une couche limite laminaire [2]. Tandis que le décollement provoque une diminution de la portance et une augmentation de la

traînée qui est faible lorsque l'angle d'attaque est petit, mais qui peut devenir importante lorsque l'angle d'attaque est prononcé, l'avion risquant alors un décrochage prématuré. Lorsque la couche limite est fortement décollée, la portance peut chuter de façon très importante, plus ou moins brutalement. Ce phénomène est à l'origine de nombreux accidents aériens, car la perte de portance peut entraîner la perte de contrôle de l'appareil.

La présence de givre augmente aussi le poids de l'avion qui peut aller au-delà de la masse maximale acceptable dans la configuration du vol. Il peut bloquer les articulations de l'avion et réduire la visibilité.

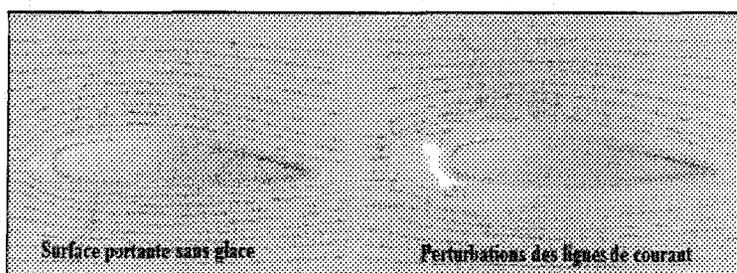


Figure 1 : Modification du profil et de la rugosité de la pale due à l'accrétion de glace

1.1.2 Givrage

Le givrage est un phénomène météorologique qui apparaît lorsque des gouttelettes d'eau surfondues présentes dans l'atmosphère, qui sont à une température inférieure au point de congélation, heurtent la surface d'un objet. À l'impact, les gouttelettes gèlent et forment des dendrites de glace qui croissent rapidement sur la surface. La vitesse de croissance de ces dendrites dépend du degré de surfusion. Un des paramètres fondamentaux du phénomène de givrage est la teneur en eau liquide. Elle indique la quantité d'eau contenue dans un volume donné d'air qui est reliée au nombre de gouttelettes d'eau en surfusion présentes

dans l'air [3]. La thermodynamique de la formation de la glace est expliquée dans l'article [4].

Le type de glace qui se forme sur un objet sous des conditions atmosphériques et météorologiques dépend principalement du taux de solidification. L'accrétion de glace s'effectue à une température sous la température de solidification de l'eau qui est de 0 °C à pression atmosphérique standard. Lorsque le taux de solidification est suffisant, la totalité ou une fraction des gouttelettes d'eau en surfusion se solidifie à l'impact avant l'arrivée d'une autre gouttelette au même endroit et la température finale à la surface de glace est inférieure ou égale à 0 °C [3].

L'accrétion se forme en régime sec ou humide. Ces régimes sont en fonction de la température de surface et de la fraction solide. La température de surface varie en fonction des échanges de chaleur et des changements de phase. La fraction solide définit la quantité de la masse d'eau liquide entrante qui se solidifie dans le volume de contrôle lors de l'impact [3].

En régime d'accrétion sec, la température de surface est inférieure à la température de solidification de l'eau, mais supérieure à celle de l'air et la fraction solide égale à un. La totalité des gouttelettes d'eau en surfusion se solidifie à l'impact avant l'arrivée d'une autre gouttelette au même endroit. Ainsi, toute l'eau collectée se transforme en givre (**Figure 2**) d'aspect blanc laiteux dû à l'air emprisonné dans sa structure, entraînant une densité plus faible que dans le cas d'un régime humide. La glace qui se forme est alors rugueuse [5].

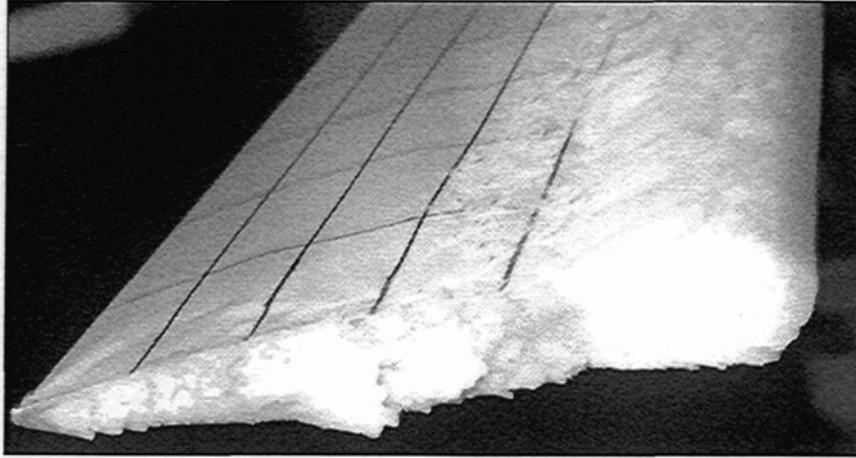


Figure 2 : Formation de givre sur un modèle réduit de pale d'hélicoptère

En régime d'accrétion humide, la température de surface est égale à la température de solidification et la fraction solide est comprise entre zéro et un. Dans ce régime d'accrétion, l'eau ne gèle pas entièrement à l'impact. Une fraction de l'eau de chaque gouttelette qui frappe la surface se transforme en verglas transparent (**Figure 3**), avec une densité élevée par rapport à celle du givre, alors que l'autre fraction d'eau ruisselle sur la surface sous l'effet des forces aérodynamiques [5].

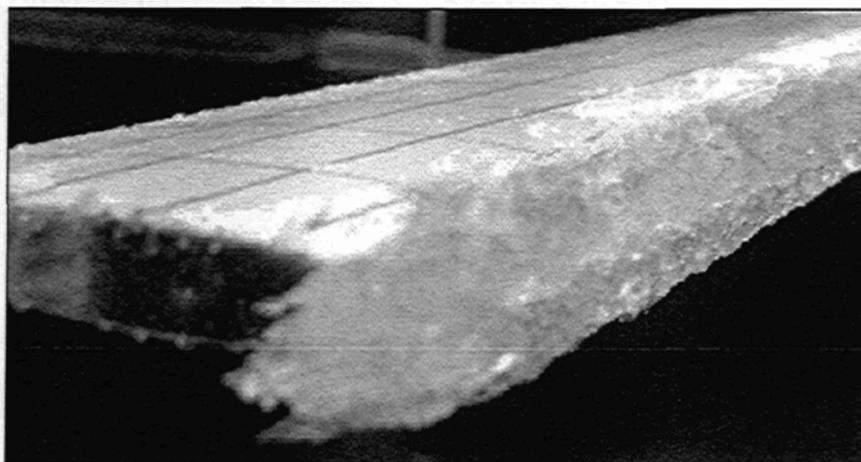


Figure 3 : Formation de verglas sur un modèle réduit de pale d'hélicoptère

Au sol, le givrage des avions a été reconnu depuis les débuts de l'aviation comme étant une source de menace potentielle pour la sécurité. Certains types de précipitations au sol peuvent être givrantes lorsque la température est sous le point de congélation. L'intensité des givrages engendrés par ces précipitations dépend surtout des conditions atmosphériques comme la température, l'intensité du vent et l'humidité relative ainsi que de la teneur en eau liquide et du diamètre volumétrique médian des gouttelettes d'eau.

1.1.2.1 Brouillard givrant

Le brouillard se forme d'une façon identique à celle des nuages; il est causé par le refroidissement d'une masse d'air humide autour d'une quantité suffisante de noyaux de condensation, mais le processus se fait au sol. Il se forme par rayonnement, advection [6] ou refroidissement adiabatique de l'air humide à son point de rosée. Si la température descend au-dessous de 0 °C, le brouillard devient givrant.

1.1.2.2 Pluie verglaçante

La pluie verglaçante se forme lorsque les flocons de neige qui tombent traversent une zone d'air chaud en altitude suffisamment épaisse pour leur permettre de fondre et de se transformer en gouttelettes d'eau [7,8]. Ces gouttelettes d'eau vont retrouver une masse d'air froid; si l'épaisseur le permet, elles vont se refroidir sous le point de congélation. Ces gouttelettes d'eau surfondues peuvent geler au contact de tout objet et former du verglas [7,8]. Ce type de précipitations présente des risques de givrage, surtout au sol.

1.1.2.3 Neige et neige mouillée

La neige est un mélange de cristaux de glace et d'air qui peut être saturé ou non en vapeur d'eau. Elle se forme à partir de la vapeur d'eau sublimée sur des noyaux glaçogènes dans les hautes couches de l'atmosphère et tombe plus ou moins vite au sol selon sa structure. Il existe deux types de neige, la neige sèche qui traverse seulement des couches d'air de températures négatives et la neige mouillée qui se forme en traversant des couches d'air de températures positives.

La neige mouillée peut se former lorsque la température de l'air près du sol est juste au-dessus de la température de solidification de l'eau. Les flocons de neige qui heurtent la surface de l'objet ou de la glace qui le recouvre ont tendance à s'agglomérer sur l'objet en raison des forces de tension de surface et former une grande charge de neige. Le degré d'adhésion de la neige dépend des conditions météorologiques [9].

1.1.3 Dégivrage et antigivrage des avions

Le dégivrage est une procédure où les contaminants sur la surface d'un avion tels que la neige, le givre ou la glace, formés à partir de précipitations givrantes de neige, de brouillard ou de pluie verglaçante, sont enlevés par des moyens mécaniques, thermiques ou, dans le cas d'un fluide de dégivrage, une combinaison de chaleur et de pression hydraulique [10].

L'antigivrage est une procédure de précaution visant à empêcher, pendant une certaine période de temps, la formation de givre et de glace, et l'accumulation de neige sur les surfaces traitées d'un avion, comme la voilure et l'empannage [2].

Différentes techniques pour dégivrer les avions au sol et en vol peuvent être utilisées. Elles sont toutes très différentes les unes des autres, tant pour la technologie utilisée que pour leur mode de fonctionnement : naturel, mécanique, thermique ou chimique.

1.1.3.1 En vol

Plusieurs systèmes sont utilisés pour la protection contre le givre en vol; ils peuvent être utilisés en mode antigivre ou dégivrant, mais leur utilisation en mode antigivre consomme plus d'énergie qu'en mode dégivrant, car ils fonctionnent en permanence.

– Le dégivrage électrothermique

Les systèmes de dégivrage thermiques sont essentiellement électrothermiques. Ils associent à la fois les effets thermiques et électriques. Le dégivreur électrothermique utilise des résistances électriques et lorsqu'un courant électrique les traverse, elles se mettent à chauffer [11]. Le chauffage provoque la fusion de la glace, ce qui entraîne la formation d'un film d'eau à l'interface glace/aile. Sous l'effet des forces aérodynamiques ou centrifuges [12], la couche de glace glisse sur le film d'eau et s'arrache de la structure.

– Le dégivrage pneumatique

Le dégivrage pneumatique est une technique utilisée généralement sous forme de tapis à installer sur les zones à dégivrer. Le principe de fonctionnement est basé sur des chambres à air qui se gonflent et se dégonflent par impulsion d'air comprimé comme on peut le voir à la **Figure 4**. Le gonflement cyclique de ces chambres a pour effet de briser et d'éjecter la glace. Le principal inconvénient de ce système est que le gonflage des chambres à air

modifie ponctuellement les propriétés aérodynamiques des ailes affectant les performances de l'avion au décollage [13].

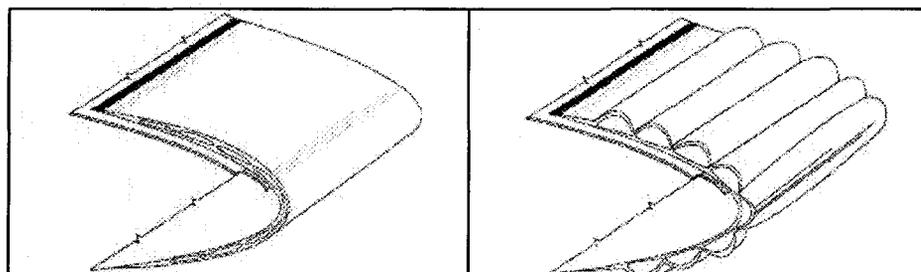


Figure 4 : Système de dégivrage pneumatique

1.1.3.2 Au sol

Les différentes techniques de dégivrage et d'antigivrage utilisées en vol peuvent être utilisées aussi au sol en plus des moyens mécaniques, de l'air forcé, de l'eau chaude et des fluides dégivrants et antigivre.

– Naturel

La façon la plus économique pour dégivrer un avion est de le laisser au soleil, bien qu'il ne soit pas pratique sur le plan opérationnel de dégivrer de cette manière.

– Moyens mécaniques

Plusieurs accessoires mécaniques sont utilisés pour aider à éliminer les contaminants givrants d'un avion, tels que le balai, la brosse, le racloir etc. (Figure 5). Par contre, ils doivent être utilisés avec un très grand soin pour ne pas endommager les composantes vulnérables de l'avion, dont le bord d'attaque, les antennes, les tubes de Pitot, les prises

statiques, les pare-brise, les capteurs d'angle d'attaque, les générateurs de tourbillons et les gouvernes [14].

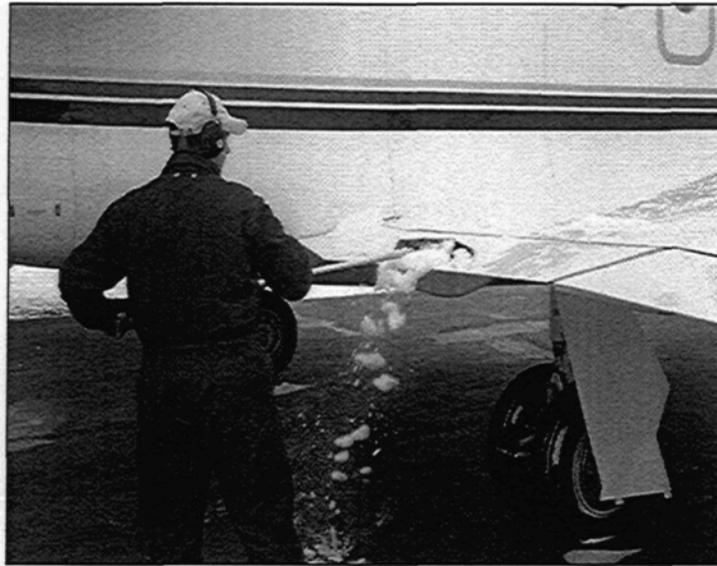


Figure 5 : Dégivrage d'une aile d'avion avec un racloir (moyen mécanique)

– Air forcé

L'air forcé est un moyen qui devient de plus en plus courant pour souffler les contaminants, particulièrement la neige sèche. L'air forcé peut être complété en injectant un fluide de type I dans l'air à très grande vitesse. L'avantage de cette méthode de dégivrage, comparativement au système d'air forcé seulement, est qu'un fluide réchauffé de type I renferme davantage d'énergie thermique que l'air seul. La chaleur constitue le mécanisme principal pour enlever les contaminants qui adhèrent aux surfaces critiques d'un avion [14].

– Eau chaude

L'eau chaude peut être utilisée pour enlever une grande quantité de contaminants d'un avion. Selon les lignes directrices de Transports Canada, la température de l'eau doit se

situer entre 60 °C et 82 °C. Toutes les surfaces arrosées avec de l'eau doivent être pulvérisées de nouveau sans tarder avec un fluide réchauffé de type I afin d'empêcher l'eau de geler [14].

– **Fluide dégivrant**

L'utilisation des fluides dégivrants reste le moyen le plus efficace pour dégivrer un avion pendant les conditions de givrage au sol. Un fluide chauffé est appliqué sous pression directement sur l'avion (**Figure 6**).



Figure 6 : Dégivrage avec un fluide de type I appliqué sous pression

– **Fluide antigivre**

L'utilisation des fluides antigivre demeure le moyen le plus efficace pour protéger durant de courtes périodes avant le décollage les composantes aérodynamiques d'un avion soumis à des précipitations givrantes au sol comme les bruines ou les pluies verglaçantes, à des brouillards givrants, à de hauts taux d'humidité ou encore à des précipitations de neige, car ils protègent toutes les surfaces de l'avion exposées aux précipitations, et surtout sa voilure.

De plus, le fluide est conservé durant la procédure de décollage et au décollage, car il assure que la voilure demeure propre juste avant la rotation de l'avion. Les caractéristiques aérodynamiques des fluides antigivre sont telles qu'ils s'éliminent d'eux-mêmes à la rotation.

La procédure d'utilisation des fluides au sol consiste à appliquer un fluide de type I (dégivrant) pour déloger les contaminants gelés des surfaces critiques d'un avion, suivi par l'application d'un fluide de type IV (antigivre) afin de protéger, durant une certaine durée de temps, les surfaces déjà traitées avec un fluide dégivrant. La durée de protection dépend de la dilution du fluide utilisé et des conditions météorologiques rencontrées.

1.1.4 Temps d'endurance

Le temps d'endurance est le temps écoulé entre le début des précipitations et le moment où des cristaux de glace recouvrent 30 % de la superficie de la plaque d'essai. Durant cette période, les fluides antigivre empêchent efficacement la formation de givre ou de neige sur les surfaces traitées qui proviennent d'une précipitation givrante ou de neige ou de brouillard givrant. Les temps d'endurance du fluide sont mesurés en laboratoire, en menant des essais dans des conditions de température et de contamination similaires à celles rencontrées par les avions au sol.

1.1.5 Homologation des fluides dégivrants et antigivre

Les fluides dégivrants sont généralement un mélange d'éthylène, de diéthylène ou de propylène glycol et d'eau dans lequel des inhibiteurs de corrosion, des agents mouillants et

des colorants sont ajoutés. Le glycol sert à abaisser le point de congélation. Ces fluides sont utilisés pour enlever les contaminants sur les surfaces extérieures de l'avion. Ils assurent également une courte durée de protection antigivre avant l'application des fluides antigivre [15].

Tous les fluides ont une température minimale d'utilisation opérationnelle (LOUT). Cette température est la température au-dessous de laquelle le fluide ne doit pas être utilisé [15].

Les fluides antigivre ont une composition similaire à celle des fluides dégivrants, sauf qu'ils contiennent en plus des épaississants. Ces derniers servent à assurer qu'une couche de 1 à 3 mm de fluide antigivre demeure sur l'avion sous présence de faible vent pour offrir une protection supplémentaire [16]. Très peu de fluide antigivre va s'écouler d'un avion immobile ou en roulage. Le fluide antigivre est un fluide non newtonien, ce qui signifie qu'au repos le fluide présente une viscosité très élevée, mais une fois qu'une force de cisaillement comme l'écoulement aérodynamique généré sur l'aile pendant le décollage est appliquée, la viscosité du fluide diminue permettant son écoulement sur l'aile avant que l'avion atteigne sa vitesse de cabrage et effectue la rotation pour le décollage.

La Society of Automotive Engineers (SAE) a élaboré des spécifications concernant les fluides dégivrants et antigivre. Le devis du matériel aéronautique (Aircraft Material Specification [AMS 1424]) de la SAE précise les spécifications de comportement des fluides dégivrants (type I), tandis que les spécifications de rendement des fluides antigivre figurent dans le document AMS 1428 de la SAE (type II, type III et type IV).

Des couleurs (**Figure 7**) sont utilisées comme aide visuelle dans l'application des fluides sur les surfaces d'avion.

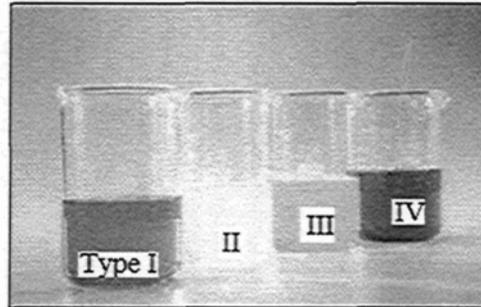


Figure 7 : Exemple de fluides dégivrants et antigivre

Les spécifications relatives aux fluides de la SAE indiquent la couleur donnée à chaque type de fluides; ces couleurs sont présentées au **Tableau 1**:

Tableau 1 : Couleur de chaque type de fluide

Type de fluide	Couleur
Type I	Orange (Si coloré) [15]
Type II	Transparent ou jaune pâle
Type III	Jaune pâle
Type IV	Vert

Tous les fluides doivent être conformes aux spécifications de la SAE; à cette fin, ils subissent de nombreux essais dans les laboratoires accrédités. Entre autres, ils doivent subir des essais de mesure de temps de protection contre la glace et tout autre type de précipitations givrantes susceptibles d'être rencontrées dans les aéroports. Aussi, ils doivent subir des essais d'acceptabilité sur le plan aérodynamique. Ces essais sont effectués dans une soufflerie et visent à déterminer si les fluides possèdent les caractéristiques aérodynamiques acceptables et s'ils s'écoulent des surfaces portantes de l'avion avant la

rotation lors du décollage. De plus, tous les fluides approuvés sont soumis à des essais de stabilité qui regroupent les essais de séchage par exposition à l'air froid et sec ou à l'air sec à température ambiante, de stabilité thermique d'un mince film de fluide, d'assèchement et de réhydratation successifs, de stabilité thermique à 70 ou 80 °C et de stabilité à l'eau dure à 95 °C [15].

1.1.5.1 Essai aérodynamique

Les fluides dégivrants et antigivre sont des contaminants appliqués sur les surfaces d'un avion. Cette contamination est occasionnée par la présence du fluide résiduel, qui peut entraîner une diminution de la portance et une augmentation de la traînée de l'avion. La contamination peut être tolérable lorsqu'une grande partie de fluide quitte les surfaces de l'avion pendant la période d'accélération qui précède le décollage ou lorsque la rugosité de la surface au moment de la rotation est inférieure à une limite prédéfinie. Pour cela, ils doivent subir un essai aérodynamique en soufflerie visant à démontrer qu'ils s'écouleront de l'avion pendant un décollage.

L'essai aérodynamique se déroule de la façon suivante : le fluide à évaluer est appliqué sur une plaque horizontale montée dans la soufflerie réfrigérée ; la vitesse en soufflerie augmente alors graduellement jusqu'à une vitesse d'essai prédéterminée.

Le résultat de l'essai est évalué par rapport à l'épaisseur de déplacement d'une couche limite (BLDT) standard, puis on détermine si le fluide a réussi ou échoué l'essai. L'acceptabilité d'un fluide est déterminée en comparant ses mesures de BLDT avec celles obtenues dans les essais sans fluide et avec un fluide de référence [17].

De nombreux essais en soufflerie sont exécutés pour chaque fluide sur une certaine plage de températures qui varient entre 0 °C et -45 °C [17] afin de déterminer la température à laquelle l'épaisseur du fluide correspond à un échec. Sur le plan aérodynamique, cette température correspond alors à la température minimale d'utilisation opérationnelle (LOUT); toutefois, une évaluation du point de congélation est nécessaire pour déterminer la LOUT du fluide en service.

1.1.5.2 Essai d'endurance

Les fluides dégivrants et antigivre doivent subir différents types d'essais d'endurance dans les laboratoires accrédités afin de déterminer leur temps de protection dans des conditions similaires à celles rencontrées dans les aéroports. Les essais réalisés sont :

Les essais d'endurance à l'eau pulvérisée (WSET). Ils simulent les conditions de brouillard givrant auxquelles une aile d'avion en attente de décollage est exposée. Ils permettent de déterminer en laboratoire le temps de protection contre la glace obtenu avec les fluides dégivrants et antigivre. L'essai est effectué à -5 °C dans une chambre climatique d'une hauteur de 3 m où un gicleur pneumatique pulvérise des gouttelettes d'eau d'un diamètre médian volumique (DMV) de 22 µm dont 50 % sont entre 15 et 35 µm [25] à une intensité de $5,0 \pm 0,2$ g/dm²/h [18]. La surface de l'aile de l'avion est représentée, dans le WSET, par une plaque en aluminium dont les dimensions sont de 30 x 10 cm inclinée à 10° par rapport à l'horizontale et maintenue à -5 °C à l'aide d'une unité de réfrigération indépendante. Où le fluide à évaluer est appliqué sur la plaque et le temps pris par le front

de glace pour atteindre 25 mm du haut de la plaque est appelé le temps d'endurance du fluide.

Les essais d'endurance à l'humidité extrême (HHET). Ils sont une simulation du givrage des fluides dégivrants et antigivre dû aux conditions de la gelée qui se produit sur les ailes d'avion pendant son stationnement durant la nuit. Ils permettent de déterminer en laboratoire le temps de protection nécessaire avant la formation de la glace sur les surfaces où le fluide est appliqué. L'essai est effectué dans une chambre climatique d'une hauteur de 3 m [19], à une température ambiante de 0 °C et à une humidité relative supérieure à 80 %, obtenue au moyen d'un générateur d'humidité. Où le fluide à évaluer est versé sur des plaques d'aluminium de 10 x 30 cm, inclinées à 10° par rapport à l'horizontale et maintenues à -5 °C à l'aide d'une unité de réfrigération indépendante [18]. Le temps d'endurance est déterminé quand le front de glace atteint 25 mm du haut de la plaque, après l'exposition du fluide à une intensité de gelée de $0,30 \pm 0,05$ g/dm²/h.

Les essais de gelée (FRST). Ils simulent les conditions de la gelée auxquelles l'avion stationné pendant la nuit peut être exposé. Ils permettent de déterminer en laboratoire le temps de protection à la gelée des fluides dégivrants et antigivre. L'essai est effectué dans une chambre climatique d'une hauteur de 3 m, à des températures ambiantes de 0 °C, -3 °C, -10 °C, -14 °C et -25 °C et à une humidité relative, variant de 70 % à 94 % selon la température de l'air, obtenue au moyen d'un générateur d'humidité. Où le fluide à évaluer est versé sur des plaques d'aluminium de 10 x 30 cm [20], inclinées à 10° par rapport à l'horizontale et maintenues à l'aide d'une unité de réfrigération indépendante, à 3 °C en dessous de la température de l'air. Le temps écoulé pour que le front de glace recouvre

50 % de la surface de la plaque détermine la performance antigivre du fluide, après son exposition à une intensité de gelée de 0,06, 0,13, 0,15, et 0,20 g/dm²/h.

Les essais de brouillard givrant (FZFG). Ils simulent les conditions de brouillard givrant auxquelles les avions peuvent être exposés avant le décollage. Ils permettent de déterminer en laboratoire le temps de protection des fluides dégivrants et antigivre en condition de brouillard givrant modéré. Le FZFG est effectué dans une chambre climatique d'une hauteur de 3 m à des températures de -3 °C, -14 °C et -25 °C [21], où un gicleur pneumatique pulvérise, sur les plaques d'essais, des gouttelettes d'eau surfondues de 23 µm de diamètre volumique médian (DVM) [19].

Le fluide est versé sur une plaque d'aluminium de 30 x 50 cm inclinée à 10° par rapport à l'horizontale [21]. Le temps mis par le front de glace à recouvrir 30 % de la surface de la plaque exposée à une intensité de 2 et 5 g/dm²/h, détermine la performance antigivre du fluide [21].

Les essais de bruine verglaçante (FZDZ). Ils sont effectués en laboratoire pour déterminer le temps de protection des fluides dégivrants et antigivre. Ils simulent les conditions de bruine verglaçante auxquelles l'avion peut être exposé avant le décollage. Les FZDZ sont effectués à -3 °C et -10 °C dans une chambre climatique d'une hauteur de 9 m [21]. Le fluide à évaluer est versé sur de grandes plaques d'aluminium de 30 x 50 cm inclinées à 10° par rapport à l'horizontale. La bruine verglaçante est simulée au moyen de deux gicleurs hydrauliques oscillants qui pulvérisent des gouttelettes d'eau à l'état surfondu

de 237 μm de diamètre volumique médian [20]. Le temps d'endurance est déterminé quand la glace recouvre 30 % de la surface soumise à une intensité de 5 et 13 $\text{g}/\text{dm}^2/\text{h}$ [20].

Les essais de la pluie verglaçante (FZRA). Ils simulent les conditions de pluie verglaçante susceptibles d'être rencontrées en aéroport. Ils permettent de déterminer en laboratoire le temps d'endurance des fluides dégivrants et antigivre à la pluie verglaçante. Les FZRA sont réalisés dans une chambre climatique d'une hauteur de 9 m à des températures de $-3\text{ }^\circ\text{C}$ et $-10\text{ }^\circ\text{C}$ [21]. Le fluide à évaluer est versé sur des plaques d'aluminium de 30 x 50 cm, inclinées à 10° et soumis à des pluies verglaçantes simulées au moyen de deux gicleurs hydrauliques oscillants qui pulvérisent des gouttelettes d'eau à l'état surfondu ayant 970 μm de diamètre volumique médian [20], avec une intensité de 13 et 25 $\text{g}/\text{dm}^2/\text{h}$ [21]. Le temps d'endurance est déterminé lorsque 30 % de la surface de la plaque est recouverte d'une couche de glace.

Les essais avec une boîte surrefroidie (RCSW). Ils simulent les conditions de la pluie sur une aile imprégnée de froid. Ils permettent de déterminer en laboratoire le temps de protection des fluides dégivrants et antigivre en cas de surrefroidissement. Les RCSW sont effectués à $+1\text{ }^\circ\text{C}$ dans une chambre climatique d'une hauteur de 9 m. Où la pluie est simulée au moyen de deux gicleurs hydrauliques oscillants qui pulvérisent des gouttelettes d'eau à l'état surfondu de 150 μm à 1 400 μm de diamètre volumique médian. Le fluide est versé sur de grandes plaques d'aluminium de 30 x 50 cm déposées sur des boîtes surrefroidies et inclinées à 10° par rapport à l'horizontale. Le temps mis par le front de glace pour recouvrir 30 % de la surface soumise à une pluie de 5 et 75 $\text{g}/\text{dm}^2/\text{h}$ d'intensité détermine la performance antigivre du fluide.

Les essais de neige (SNW). Ils simulent les conditions de neige rencontrées dans les aéroports par les avions avant le décollage. Le SNW est effectué avec de la neige fabriquée en chambre climatique. Dans une chambre froide d'une hauteur de 9 m à des températures de -5 °C, -10 °C, -14 °C, -25 °C, une boîte remplie de neige distribue continuellement de la neige à des intensités de 10 et 25 g/dm²/h sur la plaque d'essai recouverte de fluide de 30 x 50 cm inclinée à 10° par rapport à l'horizontale. Le temps écoulé pour que la neige recouvre 30 % de la surface de la plaque correspond au temps d'endurance du fluide.

1.1.5.3 Essai de stabilité

Afin de s'assurer que les fluides dégivrants et antigivre gardent leur stabilité lors de l'entreposage, ils subissent des essais de stabilité décrits dans les normes AMS 1424 et AMS 1428. Les essais de stabilité réalisés en laboratoire sont :

Les essais de stabilité thermique. Ils simulent la situation dans laquelle les fluides dégivrants et antigivre sont stockés dans un réservoir à une température élevée pendant une longue période de temps avant d'être utilisés [15, 16].

Les essais d'exposition à l'air sec. Ils sont utilisés seulement pour les fluides antigivre. Ils simulent les conditions d'une aile d'avion qui est protégée par un fluide antigivre contre l'air sec durant la nuit. Donc, il est souhaitable d'en réduire sa viscosité afin que le fluide puisse s'écouler facilement, empêchant la formation de tout résidu risquant de bloquer les mécanismes contrôlant le vol [16].

Les essais de séchage par exposition à l'air froid et sec. Ils simulent le séchage d'un film de fluide antigivre recouvrant un avion en attente de décollage. Il permet de s'assurer que le

fluide ne forme pas de gomme ou de gel épais pouvant bloquer les mécanismes contrôlant le vol [16].

Les essais d'assèchement et de réhydratation. Ils permettent de déterminer la capacité des fluides antigivre résiduels à former des gels à l'état réhydraté ou des résidus secs après plusieurs vols successifs.

Les essais de stabilité thermique d'un film mince. Ils simulent l'assèchement des bords d'attaque chauffés d'une aile d'avion [16].

Les essais de stabilité de stockage. Ils simulent le stockage des fluides dégivrants et antigivre dans des réservoirs [16].

Les essais de stabilité à l'eau dure. Ils simulent la situation de stockage des fluides dégivrants et antigivre dilués dans un réservoir à une température élevée avant leur utilisation [15,16].

1.2 Revue de littérature sur les essais de neige

L'utilisation des fluides antigivre demeure le moyen le plus utilisé au sol pour lutter contre le givrage; c'est pour cela que l'industrie des fluides est une industrie dynamique qui progresse sans cesse. Chaque année, Transports Canada et la Federal Aviation Administration (FAA) exigent des essais de durée d'efficacité pour les nouveaux fluides et les fluides qui doivent être certifiés à nouveau avant que leur utilisation soit accréditée dans les aéroports.

Parmi les essais que doit subir un fluide antigivre, on trouve l'essai de neige. Il y a quelques années, cet essai était effectué à l'extérieur, il fallait attendre jusqu'à la saison hivernale pour faire les essais de certification, ce qui n'était pas pratique. De plus, les précipitations de neige n'étaient pas toujours adéquates.

L'essai extérieur pour déterminer le temps d'endurance du fluide consistait en une plaque où il y avait une série de 15 carrés de 20 mm x 20 mm disposés en 3 colonnes et 5 rangées espacées de 75 mm. Lorsque de la neige blanche s'était accumulée sur 5 de ces 15 carrés, l'échec était déclaré. Mais l'utilisation de cette méthode n'était pas toujours pratique, comme le montre la **Figure 8**. Sur la plaque de gauche, la neige ne recouvre que trois carrés, même si l'échec aurait dû être déclaré, tandis que sur la plaque de droite, elle recouvre cinq carrés; par contre l'échec n'aurait pas dû être déclaré [26].

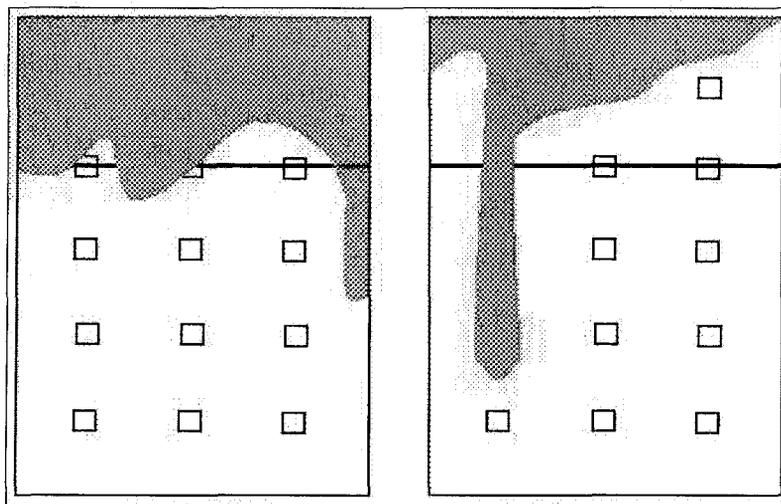


Figure 8 : Procédure de déclaration de l'échec

Deux autres méthodes ont été évaluées. La première méthode, similaire à celle décrite précédemment, consistait à mettre une série de 35 carrés de 12 mm x 12 mm disposés en 5

colonnes et 7 rangées, également répartis sur la plaque et en déclarant l'échec quand 7 carrés étaient entièrement recouverts par de la neige blanche. La seconde méthode a consisté à tracer une ligne de 150 mm du bord supérieur de la plaque d'une superficie d'environ 150 mm x 300 mm et de déclarer l'échec quand ce rectangle était entièrement recouvert de neige blanche. La surface d'échec représentait 30 % de la surface de la plaque [26].

Ces trois méthodes ont été appliquées simultanément entre novembre et décembre 1996, afin de les comparer. Les résultats recueillis par les trois méthodes ont montré que la variation des temps d'endurance obtenus n'était pas significative. Les essais ont été réalisés par quatre opérateurs afin de déterminer la méthode la plus facile pour déclarer l'échec. Les opérateurs ont préféré la méthode basée sur la ligne à 150 mm du bord supérieur de la plaque (30 % de la plaque) [26].

Des recherches ont été faites afin de pouvoir évaluer la durée d'efficacité des fluides en laboratoire. Une fois que le système d'essai de neige intérieur a été mis en place, les chercheurs ont constaté que ces essais étaient caractérisés par une durée d'efficacité plus courte que celle mesurée à l'extérieur [22]. Cette différence a été attribuée à l'effet du vent. Pour pouvoir le reproduire, le NCAR a produit des procédures pour l'essai de neige à l'intérieur en utilisant des plaques d'essai à température contrôlée. Cette modification a permis d'obtenir des résultats de durée d'efficacité similaires à ceux obtenus à l'extérieur [22].

Des recherches ont été effectuées afin de développer une méthode plus objective pour déclarer l'échec d'un fluide ainsi que son temps d'endurance, en remplacement de la méthode utilisée à l'extérieur et à l'intérieur qui est de déclarer l'échec quand 30 % de la plaque est recouverte de neige blanche. Pour ce faire, la température de la plaque a été contrôlée à une température de consigne, et l'énergie nécessaire pour maintenir cette température a été enregistrée. Les résultats présentés aux figures suivantes ont été obtenus dans une chambre climatique du LIMA au cours de l'année 2004.

La **Figure 9** montre l'énergie fournie à la plaque pour maintenir sa température constante à $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ durant un essai réalisé à une température de l'air d'environ $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. La plaque est équipée d'un élément chauffant. Au début de l'essai, la température de la plaque commence presque à la même valeur que celle de l'air. Par la suite, la température de la plaque descend jusqu'à ce qu'elle atteigne la température de consigne; à ce moment, le chauffage débute et la chaleur fournie est enregistrée. Dans cet essai, l'échec a été déclaré après 75 minutes, ce qui correspond au début de la stabilisation du chauffage. À ce moment, la plaque ne requiert plus d'énergie pour maintenir sa température à une valeur constante.

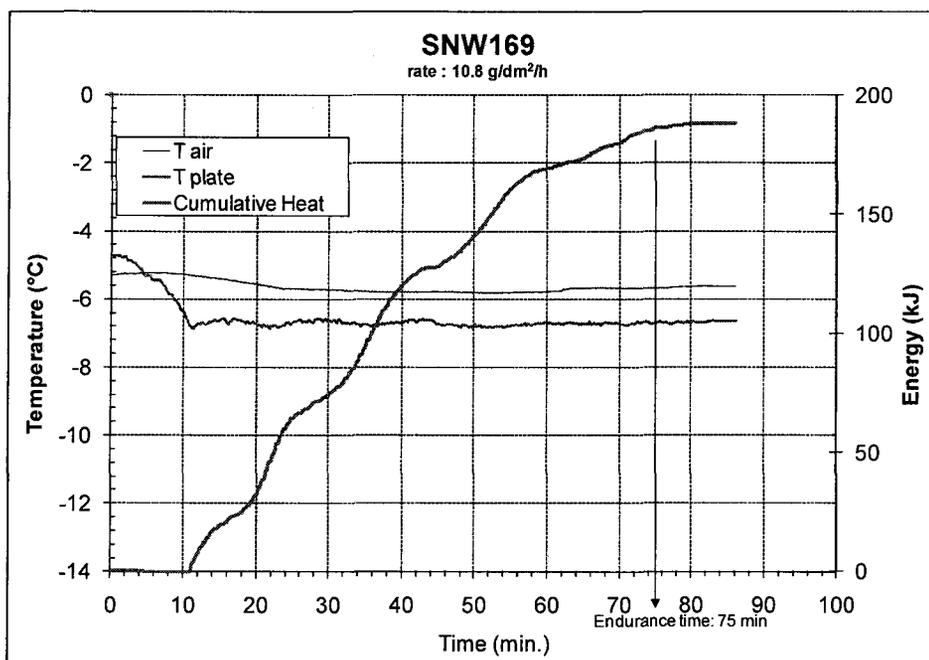


Figure 9 : Température de l'air et de la plaque enregistrée durant un essai (LIMA 2004), [22]

1.3 Problématique

Les fluides dégivrants et antigivre sont utilisés pour éliminer et prévenir la formation de tous les types de précipitations givrantes, comme le brouillard givrant, la gelée, la bruine verglaçante, la pluie verglaçante et la neige, sur les avions avant le décollage. Ils sont caractérisés par leur durée d'efficacité, communément appelée temps d'endurance, qui est évalué et approuvé en fonction des normes SAE (AMS 1424 pour les fluides dégivrants de type I et AMS 1428 pour les fluides antigivre de types II, III et IV). C'est ce qui permet de publier les temps d'endurance des fluides, sous forme de tableaux de durée d'efficacité, qui sont utilisées par les pilotes comme lignes directrices indiquant la durée de protection d'un fluide sous certains types de précipitations givrantes.

Cependant, sous précipitations de neige, les temps d'endurance sont basés sur des essais d'endurance impliquant une estimation visuelle de l'échec sur une plaque plane, quand 30 % du fluide est recouvert de neige blanche. Comme le mécanisme conduisant à l'échec du fluide n'est pas bien compris, l'estimation visuelle demeure le seul moyen d'évaluer le temps d'endurance.

Comme l'évaluation visuelle dépend d'un opérateur, il serait plus sécuritaire de disposer d'une méthode plus scientifique. Pour ce faire, il faut identifier le mécanisme conduisant à l'échec du fluide. Il apparaît donc nécessaire d'acquérir des données expérimentales sur les essais de neige, pour comprendre le mécanisme qui conduit le fluide antigivre à l'échec et déterminer les paramètres qui influencent l'échec d'un fluide au cours d'un essai, comme l'intensité des précipitations, le type de neige, la température de l'air, etc.

1.4 Objectifs

1.4.1 Objectif principal

L'objectif principal de ce mémoire est de déterminer les paramètres qui participent à l'échec d'un fluide antigivre et d'élaborer, si possible, un mécanisme expliquant l'échec du fluide durant l'essai d'endurance à la neige.

1.4.2 Objectifs secondaires

Pour réaliser l'objectif principal, certains objectifs secondaires doivent être atteints : réduire le nombre de variables en jeu, ce qui permettra peut-être de faire ressortir le mécanisme

conduisant à l'échec du fluide; développer un fluide antigivre générique à base de glycol afin d'éliminer l'effet des additifs augmentant la viscosité du fluide et; diminuer les variations des paramètres mesurés afin de réduire leur influence sur le mécanisme conduisant à l'échec du fluide.

1.5 Méthodologie

La réalisation des objectifs mentionnés au paragraphe précédent est obtenue à partir d'une approche expérimentale. Un fluide antigivre générique à base de glycol a été préparé au Laboratoire international des matériaux antigivre (LIMA), et le montage expérimental défini dans la norme ARP5485 est utilisé, avec quelques modifications afin de simplifier les phénomènes en jeu et réduire le nombre de paramètres. Le montage expérimental utilisé consiste en une plaque plane en aluminium disposée horizontalement afin de prévenir l'effet de l'écoulement du fluide et de la diminution de son épaisseur due à son élimination. La plaque est entourée de murs isolés qui empêchent l'élimination du fluide. La température de la plaque est maintenue à la valeur désirée à l'aide d'un système de chauffage thermoélectrique contrôlé par un automate à l'aide d'un thermocouple situé à l'interface plaque/élément chauffant. Cette modification permet d'éliminer l'effet de la viscosité du fluide, qui est considéré comme un paramètre secondaire.

Les conditions expérimentales utilisées sont celles spécifiées dans la norme ARP5485 et annexées au présent document. Les essais sont effectués dans la chambre climatique de 9 m du LIMA à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC).

Les résultats des essais sont analysés afin d'établir une relation entre le temps d'endurance du fluide, l'intensité des précipitations, la température, la puissance fournie et la concentration du fluide.

1.6 Plan de travail

Ce mémoire est composé de **six** chapitres. Le **premier chapitre** d'introduction vise à présenter le sujet de recherche avec sa problématique, les objectifs, la méthodologie utilisée et la revue de littérature qui a permis de se familiariser avec les différentes notions liées à ce sujet, comme l'effet du givre sur les avions, le givrage, le dégivrage et l'antigivrage, le temps d'endurance et les différents essais de certification des fluides.

Le **chapitre 2** décrit la partie expérimentale, c'est-à-dire le montage utilisé pour réaliser les essais d'endurance, la préparation de la neige, le fluide générique utilisé, les conditions expérimentales et la procédure expérimentale suivie lors d'un essai de neige.

Le **chapitre 3** est consacré à la présentation détaillée des résultats obtenus pour la puissance fournie à la plaque, les températures de la plaque et de l'air, le temps d'endurance, la masse de neige accumulée, la concentration du fluide, l'épaisseur du fluide, et la température de solidification lors des différents essais réalisés avec différentes conditions expérimentales.

Le **chapitre 4** présente une interprétation des résultats obtenus et analyse les paramètres influençant l'échec comme l'intensité des précipitations, la masse de neige accumulée, la concentration du fluide, la puissance et l'énergie fournie à la plaque, la température de solidification et le temps d'endurance.

Le **chapitre 5** décrit le processus qui amène à l'échec du fluide durant un essai de neige.

Le **chapitre 6** est consacré aux conclusions et recommandations qui sont tirées de ce mémoire.

Le mémoire se termine par la bibliographie et la section des annexes qui présente en détail les essais réalisés lors de ce mémoire.

CHAPITRE II

EXPÉRIMENTATION

CHAPITRE II

EXPÉRIMENTATION

2.1 Description de l'essai

Afin d'observer et de comprendre le comportement des fluides antigivre sous des précipitations de neige, des essais ont été effectués dans la chambre de 9 m du LIMA contrôlée à ± 1 °C. Ils sont basés sur les essais d'endurance normalisés pour les fluides antigivre utilisés sur les avions en attente de décollage décrits dans la norme ARP5485. Pour les essais d'endurance, une plaque plane (**Figure 10**) recouverte d'un litre de fluide est exposée à des précipitations givrantes d'intensités et de températures prédéterminées.

La neige fond et est absorbée par le fluide mais, en raison de la baisse de température et de la dilution du fluide sous les précipitations, la neige qui tombe sur la plaque finit par ne plus fondre. À ce moment, le fluide perd son pouvoir d'antigivre; lorsque la neige recouvre 30 % de la plaque, le temps d'endurance est noté.

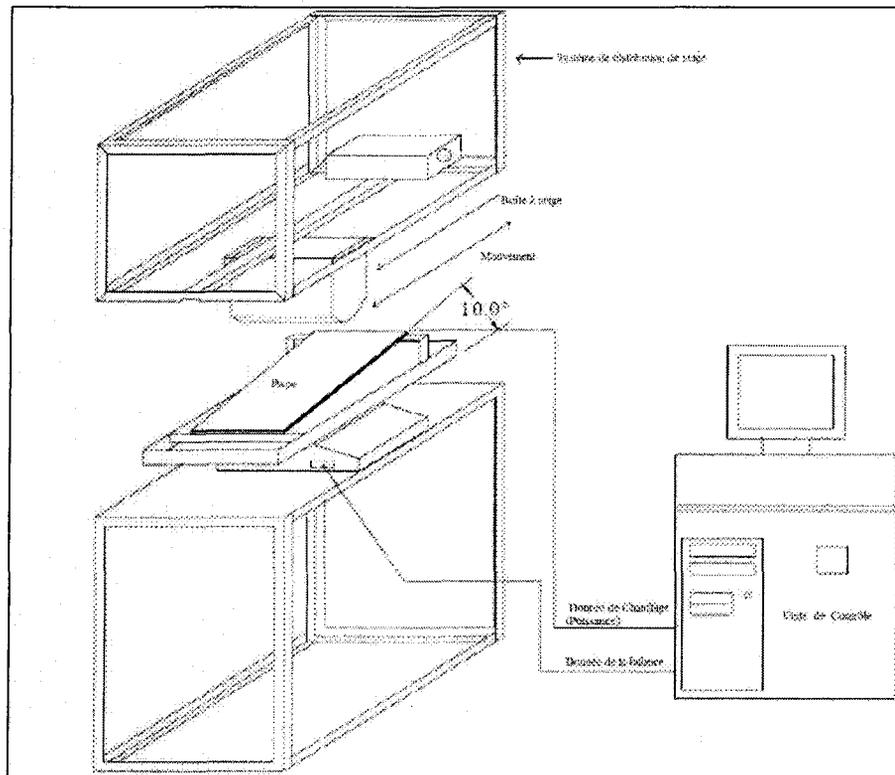


Figure 10 : Montage expérimental pour les essais d'endurance de neige selon la norme ARP 5485

Une procédure similaire a été reprise pour les essais qui serviront à comprendre l'absorption de la neige par le fluide qui a été spécifiquement utilisé durant les essais réalisés dans ce travail. Cependant, le montage expérimental (**Figure 10**) a été modifié afin de simplifier la physique du phénomène. Le montage utilisé consiste en une plaque plane en aluminium disposée horizontalement (**Figure 11**) afin d'éliminer l'effet de l'écoulement du fluide. De plus, des parois ont été ajoutées à la plaque formant un récipient permettant l'accumulation des précipitations. Ces parois sont isolées afin de limiter au minimum les pertes thermiques.

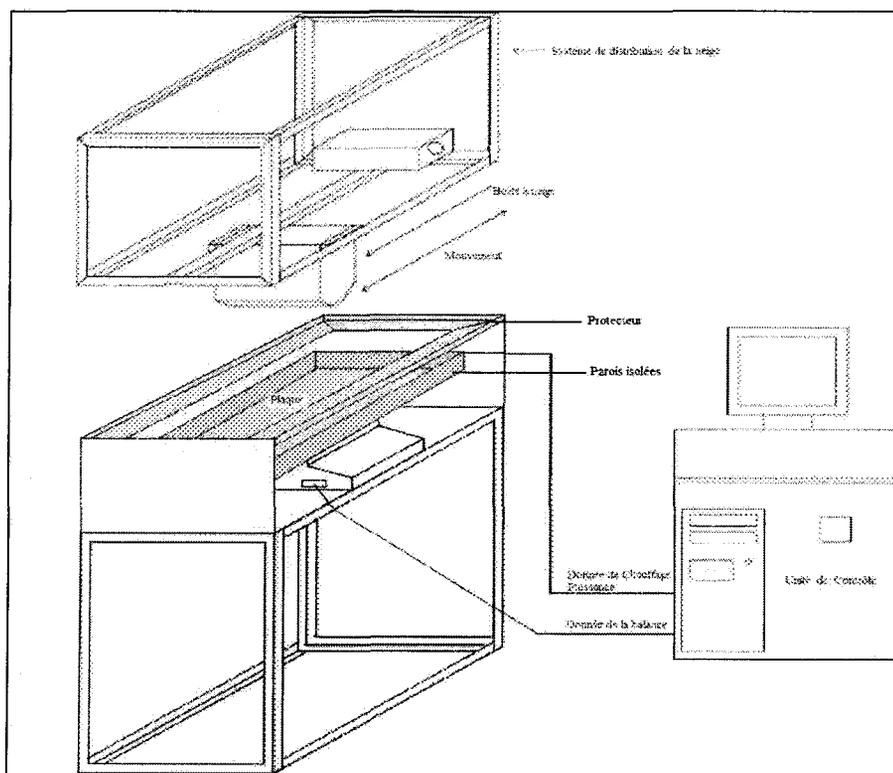


Figure 11 : Montage expérimental utilisé pour les essais d'endurance de neige

Les essais de neige sont effectués à des températures de plaque et d'air et à des intensités de précipitations prédéterminées dans la norme. La température de la plaque d'essai est maintenue à la valeur désirée au moyen d'un élément chauffant contrôlé par un automate à ± 1 °C. La température du fluide est assurée en le laissant reposer dans la chambre froide ou dans un congélateur à température contrôlée. La température du fluide est vérifiée avec un thermomètre avant l'essai. Étant donné que la plaque n'est pas inclinée et qu'elle est placée dans un récipient, afin d'assurer que le fluide forme une couche d'une épaisseur de 2,7 mm sur la plaque, une quantité de 400 ml de fluide y est versée; une fois que celle-ci est complètement recouverte de fluide, l'essai débute.

2.2 Description du montage

Le système de distribution de neige est constitué d'une plaque plane en aluminium de 50 cm de longueur par 30 cm de largeur (**Figure 12**), et d'une boîte à neige en aluminium qui a la forme d'un U de 320 mm de longueur, 253 mm de hauteur et 132 mm de largeur avec un tiroir de 65 mm de hauteur pour ajouter de la neige pendant les essais.

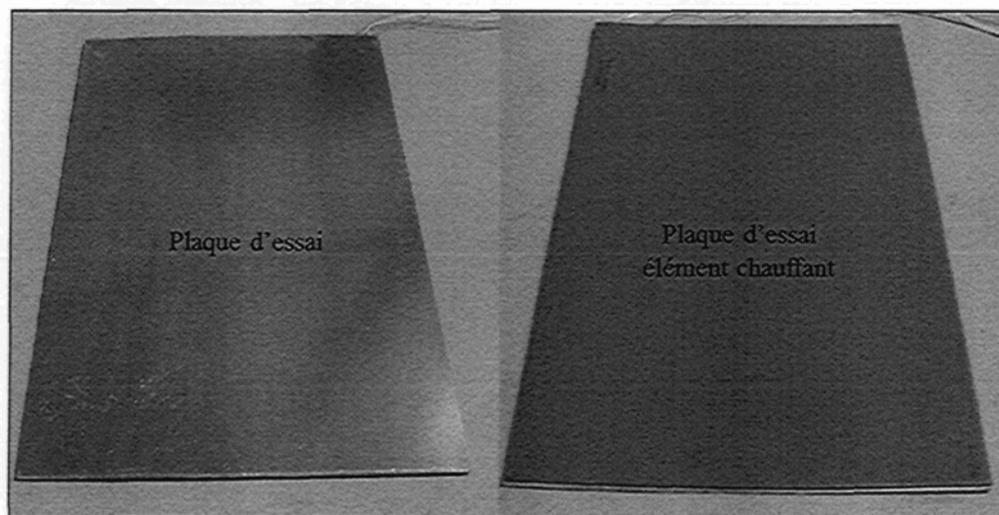


Figure 12 : Plaque d'essai recouverte par un élément chauffant

La distance entre la plaque et la boîte à neige est de 336 mm. Une photo du système de distribution de la neige est présentée à la **Figure 13** ainsi qu'une coupe transversale de la boîte à neige à la **Figure 14**.

La boîte à neige est placée sur un rail relié à un moteur par une courroie qui fournit un mouvement latéral à la boîte distribuant la neige. La vitesse de déplacement latéral qui est contrôlé par ordinateur dépend de l'intensité désirée pour l'essai.

La neige est continuellement agitée à l'intérieur de la boîte par un système de rotation composé de trois pales disposées à un angle de 120 degrés l'une par rapport à l'autre (**Figure 15 b**) et chaque pale mesure 50 x 300 mm. La boîte est munie d'un cylindre en acrylique (**Figure 15 a**) où des trous demi-sphériques permettent à la neige de tomber sous forme de groupes distribués selon la position des trous sur le cylindre; la masse de chaque groupe est d'environ 0,10 g [22]. Le volume des trous pour le cylindre à petits trous est de 0,34 cm³, et de 0,65 cm³ pour les gros trous.

Au cours des essais, la température de l'air et de la plaque ainsi que la masse de neige précipitée et la puissance fournie à la plaque sont enregistrées en temps réel.

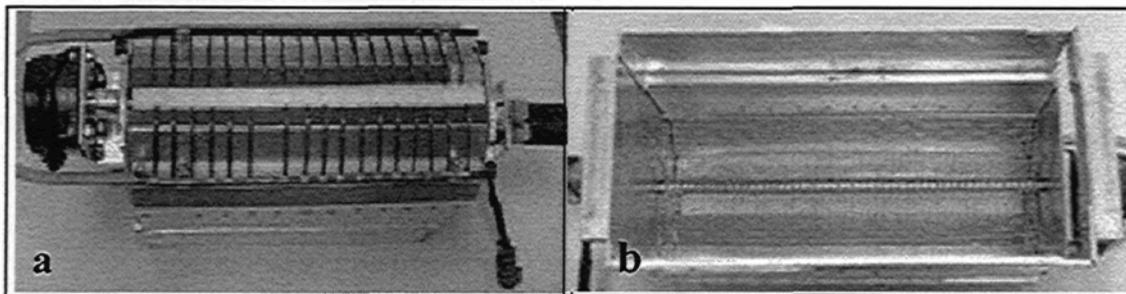


Figure 15 : a) Vue de l'extérieur de la boîte à neige b) Vue de l'intérieur de la boîte à neige

La plaque qui est recouverte par un élément chauffant est munie de deux thermocouples, situés à l'interface plaque/élément chauffant, l'un est utilisé pour contrôler la température de la plaque, et l'autre pour mesurer sa température et quantifier les pertes thermiques induites par la présence de fluide et les précipitations de neige. Un autre thermocouple est placé afin de mesurer la température de fluide.

Le montage est relié à un automate qui gère l'énergie apportée aux éléments chauffants. Cet automate permet de maintenir la température de la plaque à la valeur désirée. L'automate et

les capteurs du montage sont reliés à un ordinateur, où un programme informatique qui enregistre les températures de l'air et de la plaque ainsi que la puissance consommée. La plaque est placée sur une balance qui mesure la masse de la neige qui tombe sur la plaque. La balance est reliée à un ordinateur qui enregistre la masse de neige et permet de contrôler l'intensité des précipitations selon la masse de neige mesurée et sa densité (Figure 16).

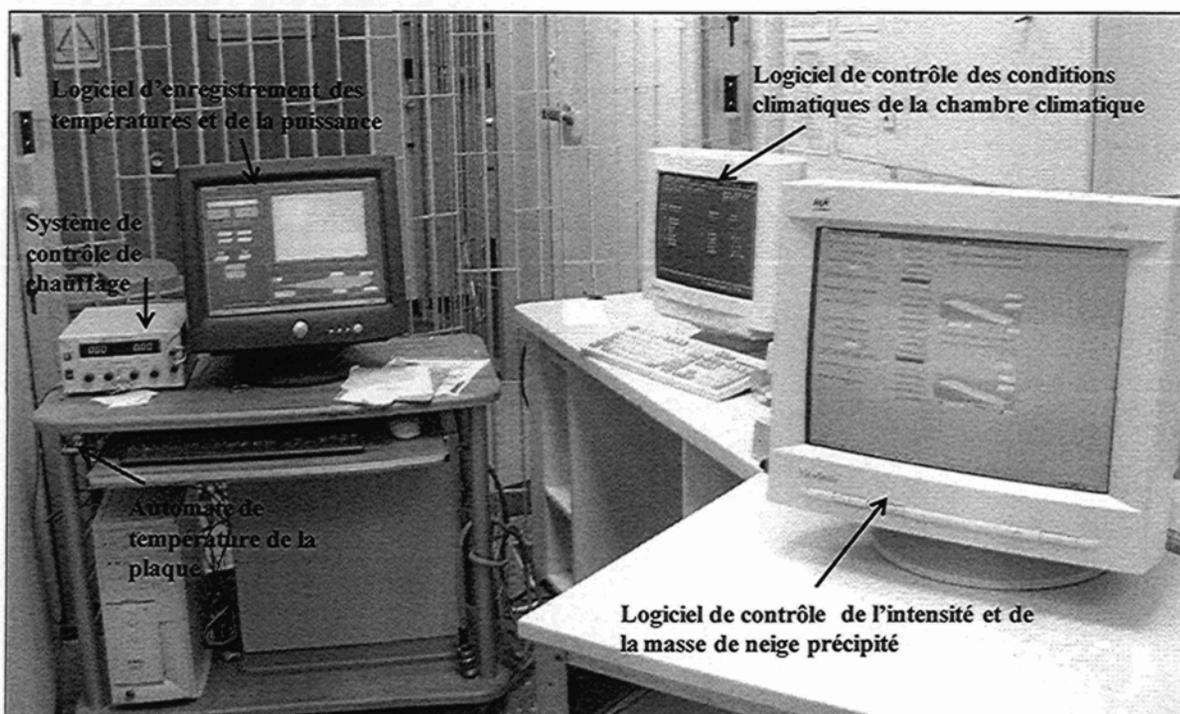


Figure 16 : Systèmes d'acquisition des données et de contrôle des essais

2.3 Préparation de neige

La neige est fabriquée dans une chambre climatique à l'aide de gicleurs pneumatiques. Ces gicleurs produisent des gouttelettes d'eau, dont le diamètre volumétrique médian est de $22 \mu\text{m} \pm 3 \mu\text{m}$ et qui, durant leur chute, se refroidissent dans l'air froid pour devenir surfondues et, au contact des plaques d'acier galvanisé du plancher, gèlent pour former des

petites billes de glace agglomérées. Les agglomérats ainsi formés sont apparentés à des flocons de neige artificielle [23].

Une fois que la neige est fabriquée, elle est récupérée (**Figure 17**), placée dans des contenants isolés et entreposés dans un congélateur. La qualité de la neige est vérifiée avant chaque essai en mesurant sa densité.



Figure 17 : Ramassage de la neige artificielle

2.4 Fluide antigivre générique

Les fluides antigivre de l'industrie aéronautique ont une composition complexe et secrète, la plupart étant protégé par un brevet d'invention. On a donc opté pour l'utilisation d'un fluide antigivre de formulation simple fabriqué au LIMA est utilisé. L'avantage d'utiliser ce fluide est que ses propriétés physiques et thermiques telles que la densité, la chaleur spécifique, la conductivité thermique et la viscosité sont très bien connues en fonction de la

concentration et de la température, ainsi que sa température de solidification qui est seulement fonction de la concentration [24].

Selon la norme, les fluides utilisés pour réaliser les essais ont des dilutions de 50/50 (glycol/eau) où de 75/25. Dans ce mémoire, la dilution utilisée est de 50/50 et le fluide, à base de propylène glycol, a une concentration de 88 %. Donc, le fluide antigivre générique est une dilution (volume/volume) de 44 % de propylène glycol et de 56 % d'eau déminéralisée.

2.4.1 Propriétés du propylène glycol

Les propriétés du propylène glycol dilué par l'eau présentées dans cette section sont tirées de « M. CONDE ENGINEERING, 2002, Properties of Working Fluids ». [24]

2.4.1.1 Température de solidification

La température de solidification T_f du fluide à base de propylène glycol et d'eau dépend de la concentration du glycol C_{glycol} dans le fluide, elle est déterminée par l'équation suivante :

$$\frac{T_f}{273,5} = A_0 + A_1 C_{glycol} + A_2 C_{glycol}^2 \quad \text{Équation 1}$$

Les valeurs des coefficients A_0 , A_1 et A_2 sont présentées à la page suivante au **Tableau 2**.

2.4.1.2 Densité, chaleur spécifique et conductivité thermique

La densité, la chaleur spécifique et la conductivité thermique du fluide à base de propylène glycol et d'eau sont reliés par l'équation suivante :

$$P = A_0 + A_1 C_{glycol} + A_2 \frac{273,15}{T} + A_3 C_{glycol} \frac{273,15}{T} + A_4 \left(\frac{273,15}{T} \right)^2 \quad \text{Équation 2}$$

Elles sont fonction de la température et de la concentration; les coefficients A_0 , A_1 , A_2 , A_3 et A_4 sont présentés au **Tableau 2**.

2.4.1.3 Viscosité dynamique

La viscosité dynamique du fluide à base de propylène glycol et d'eau dépend de la concentration de ce dernier dans le fluide utilisé et de la température; elle est définie par l'équation suivante :

$$\ln(P) = A_0 + A_1 C_{glycol} + A_2 \frac{273,15}{T} + A_3 C_{glycol} \frac{273,15}{T} + A_4 \left(\frac{273,15}{T} \right)^2 \quad \text{Équation 3}$$

Les coefficients A_0 , A_1 , A_2 , A_3 et A_4 sont présentés au **Tableau 2**.

Tableau 2 : Coefficients utilisés dans les équations de propriétés de propylène glycol

A	Densité kg/m ³	Chaleur spécifique J/kg/K	Conductivité thermique W/m/K	Viscosité dynamique Pa s	Température solidification K
0	508,41109	4476,42	1,18886	-1,02798	1,0
1	-182,40820	608,63	-1,49110	-10,03298	-0,03736
2	965,76507	-714,97	-0,69682	-19,93497	-0,40050
3	280,29104	-1938,55	1,13633	14,65802	-
4	-472,22510	478,73	0,06735	14,62050	-

2.5 Procédure expérimentale

La procédure suivie lors des essais consiste à verser 400 ml de fluide sur la surface de la plaque exposée à des précipitations de neige, et à noter le temps nécessaire pour qu'il atteigne son temps d'endurance. Pour ce faire, il faut suivre plusieurs étapes regroupées en

quatre étapes principales. La première étape consiste à préparer la neige est la mettre dans des contenants isolés; la deuxième étape consiste à préparer le fluide et à le mettre dans la chambre froide; la troisième étape est de régler les températures de la chambre froide et de la plaque et enfin; la dernière étape est de démarrer l'essai et d'enregistrer les informations obtenues. Les différentes étapes à réaliser pour un essai sont détaillées de façon plus précise dans cette section.

La masse ou l'intensité de neige précipitée durant un essai est contrôlée par un programme informatique, dont l'interface est présentée à la **Figure 18**.

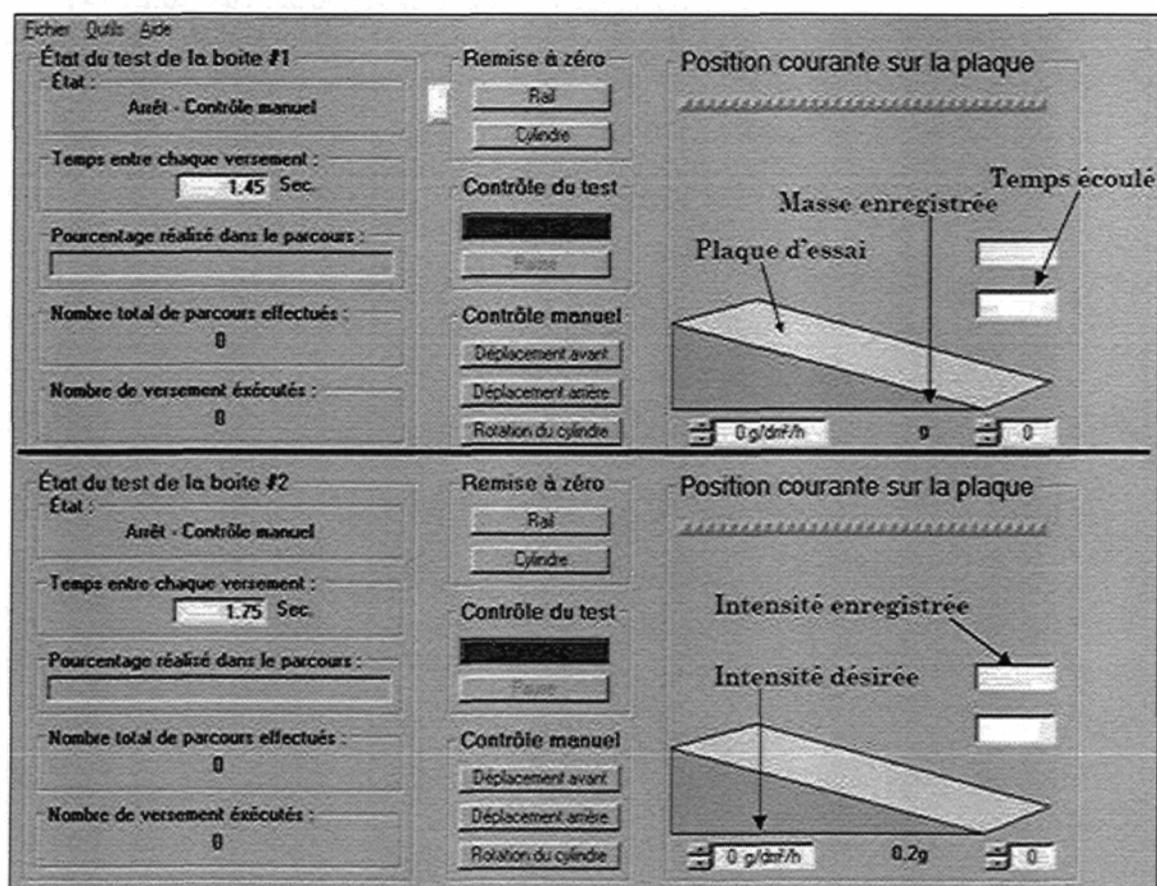


Figure 18 : Programme de contrôle de la boîte à neige

Le temps entre chaque versement qui correspond au temps écoulé en secondes entre deux versements de neige est déterminé automatiquement par le programme pour obtenir l'intensité désirée. Plus ce temps est court, plus l'intensité des précipitations est élevée.

Durant chaque essai, des paramètres sont contrôlés selon les conditions de précipitations prédéterminées dans la norme, qui sont :

- La dilution du fluide (concentration de glycol et d'eau dans le fluide évalué);
- l'intensité des précipitations désirée;
- la masse de neige mesurée par la balance située sous la plaque d'essai;
- l'intensité des précipitations enregistrée par le programme est calculée à partir de la masse de neige mesurée par la balance et le temps entre deux versements;
- la température de la chambre climatique;
- la température de la plaque;
- la température de fluide pour les essais complémentaires;
- la puissance pour maintenir la température de la plaque;
- l'indice de réfraction pour les essais complémentaires.

Pour effectuer un essai, les étapes suivantes doivent être respectées :

1. Préparation de la chambre climatique, au minimum une journée avant l'essai, qui consiste à installer la plaque d'essai et la boîte à neige sur leur support respectif et

s'assurer que l'automate qui contrôle la température de la chambre est à la température désirée, ainsi que celle de la température de la plaque.

2. Placer les contenants isolés de neige dans la chambre froide.
3. Placer le fluide préparé dans la chambre au moins 24 heures avant l'utilisation.
4. Connecter le tuyau de pression amenant l'air à la boîte à neige et ajuster la pression à 35 ± 1 psi.
5. Mesurer la densité de la neige. Tout le matériel utilisé pour mesurer la densité de la neige doit être à la température de la chambre :
 - Peser le contenant de plastique vide;
 - tamiser la neige au-dessus du contenant jusqu'à ce qu'il soit plein;
 - égaliser la neige avec une règle en prenant bien soin de ne pas la compacter, puis peser le contenant;
 - effectuer le calcul pour déterminer la densité de la neige en g/cm^3 .

$$\rho = \frac{M_{\text{plein}} - M_{\text{vide}}}{\text{Volume}} (\text{g/cm}^3) \quad \text{Équation 4}$$

6. À partir de la densité de neige mesurée, et de l'essai effectué auparavant, le temps de versement est calculé.
7. Entrer l'intensité désirée et le temps calculé entre deux versements dans le logiciel.

8. Ouvrir la source alimentant le batteur et le mettre sous tension. S'assurer qu'il tourne adéquatement sans frotter contre les parois de la boîte à neige.
9. Ouvrir la source alimentant le cylindre et le mettre sous tension. Effectuer une rotation et vérifier si le cylindre tourne bien.
10. Démarrer le programme de contrôle de la boîte à neige et préparer l'acquisition des données de la balance. Mettre en marche la boîte sur le rail pour s'assurer qu'elle se déplace adéquatement. Effectuer une rotation du cylindre pour s'assurer qu'il fonctionne.
11. Tamiser la neige dans le chargeur.
12. Mesurer la température du fluide.
13. Vider le chargeur de neige dans la boîte à neige.
14. Mettre en marche l'automate qui contrôle la température de la plaque et la source de puissance alimentant l'élément chauffant.
15. Verser le fluide préalablement refroidi sur la plaque d'essai à partir du haut, le plus rapidement possible.
16. Tarer la balance.
17. Mettre en marche la boîte à neige, puis démarrer le chronomètre au même moment.
18. Ajouter de la neige dans la boîte à neige au cours de l'essai, si nécessaire.
19. Observer le fluide sur la plaque d'essai, noter le moment où la neige blanche recouvre 30 % de la surface de la plaque d'essai.

2.5.1 Mesure de la concentration volumique en propylène glycol

Pour mesurer la concentration en propylène glycol durant les essais réalisés, deux méthodes sont utilisées : la méthode théorique basée sur les volumes de glycol et d'eau initiaux ainsi que le volume de neige qui tombe au cours de l'essai, et la méthode expérimentale avec l'utilisation d'un réfractomètre.

2.5.1.1 Méthode théorique

La méthode théorique permet de déterminer la concentration du fluide en propylène glycol C_{glycol} à partir des volumes initiaux de glycol et d'eau et du volume d'eau calculé à partir de la masse de neige qui tombe. Elle donne la concentration du fluide en propylène glycol à chaque instant si l'eau se mélange instantanément et complètement dans le fluide. Pour tous les essais réalisés, la concentration est calculée avec cette méthode.

L'équation utilisée est la suivante :

$$C_{glycol} = \frac{\frac{M_{glycol}}{\rho_{glycol}}}{\frac{M_{glycol}}{\rho_{glycol}} + \frac{M_{eau}}{\rho_{eau}} + \frac{M_{neige}}{\rho_{neige}}} \quad \text{Équation 5}$$

2.5.1.2 Méthode expérimentale :

Un réfractomètre (**Figure 19**) est utilisé plusieurs fois pendant un même essai pour mesurer la concentration du fluide. Étant donné que la neige tombe continuellement jusqu'à ce que l'échec soit atteint, la concentration en propylène glycol diminue tout au long de l'essai.

Cette méthode est utilisée uniquement pour la dernière série d'essais (essais complémentaires).

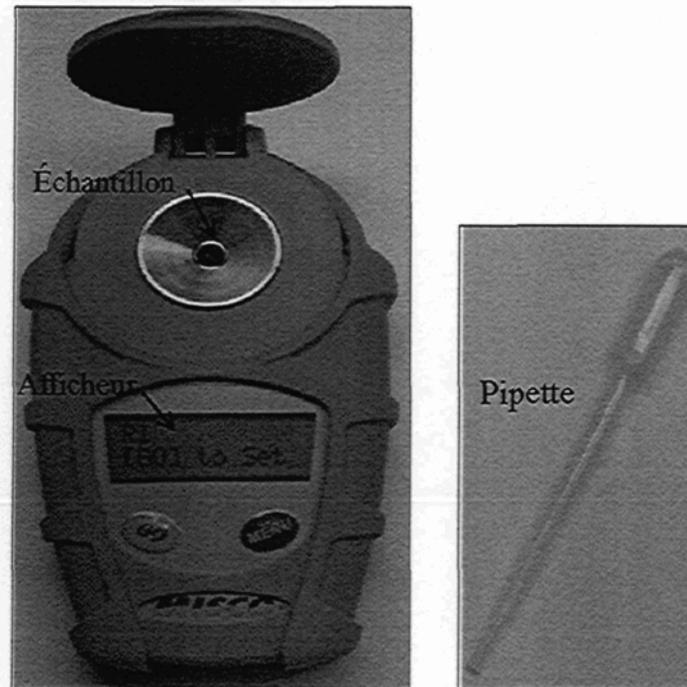


Figure 19 : Réfractomètre numérique MISCO Palm Abbe N°: PA-202X

Le réfractomètre utilisé durant les essais est un réfractomètre numérique portable (MISCO Palm Abbe N°: PA-202X). Les échantillons de fluide sont prélevés durant les essais au moyen d'une pipette (**Figure 19**) et l'échantillon est déposé sur le réfractomètre. Ce dernier affiche l'indice de réfraction de l'échantillon. À l'aide d'un graphique (**Figure 20**) qui représente la concentration en fonction de l'indice de réfraction, la concentration de chaque échantillon est déterminée.

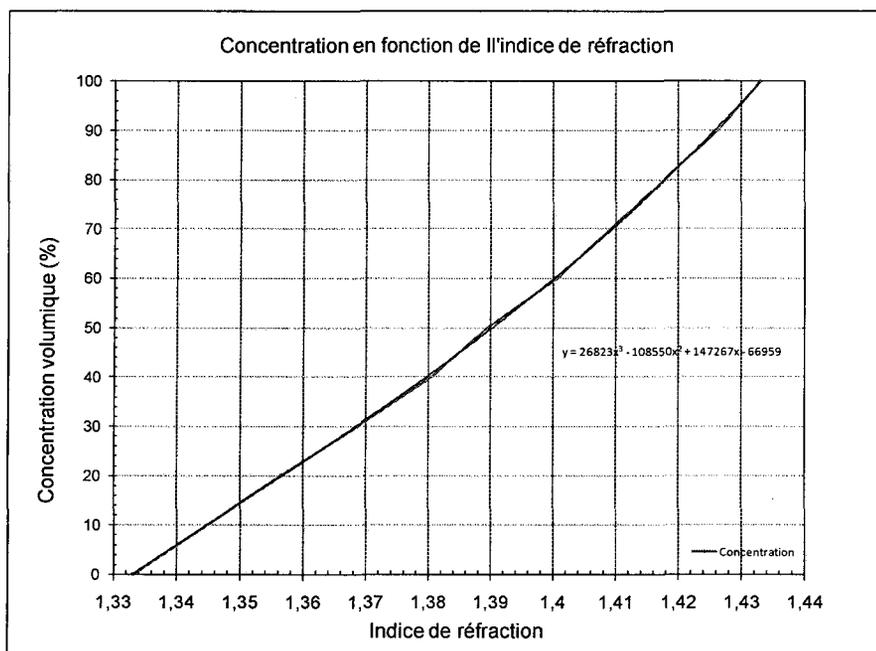


Figure 20 : Concentration de propylène glycol en fonction de l'indice de réfraction

Ce graphique (**Figure 20**) est réalisé à partir d'échantillons de propylène glycol de concentrations déjà connues.

2.6 Conditions expérimentales

Les conditions climatiques des essais pour déterminer le temps d'endurance d'un fluide antigivre sous précipitations de neige selon la norme ARP5485 sont présentées au **Tableau 3**. La valeur de température de la plaque est l'effort de plusieurs années de recherche et d'essais effectués à l'extérieur et à l'intérieur en laboratoire. Ces efforts ont permis de produire l'équation suivante qui regroupe les températures de l'air et de la plaque ainsi que l'intensité à laquelle l'essai est réalisé. Cette équation n'inclut pas la température de -5 °C.

$$T_{\text{plaque}} = T_{\text{Air}} - 0,065 * I - 0,5$$

Équation 6

Tableau 3 : Conditions expérimentales

Condition (C)	Intensité neige (g/dm ² /h)		Température			
			Air (°C)		Plaque (°C)	
1	10	±0,6	-5	±0,5	-4,2	±0,5
2	10	±0,6	-10	±0,5	-11,2	±0,5
3	10	±0,6	-14	±0,5	-15,2	±0,5
4	10	±0,6	-25	±0,5	-26,2	±0,5
5	25	±1,5	-5	±0,5	-5,1	±0,5
6	25	±1,5	-10	±0,5	-12,1	±0,5
7	25	±1,5	-14	±0,5	-16,1	±0,5
8	25	±1,5	-25	±0,5	-27,1	±0,5

CHAPITRE III
RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

CHAPITRE III

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Quatre séries d'essais ont été effectuées. Une première série de 38 essais a été réalisée dans le but de vérifier le fonctionnement du système et d'apporter des ajustements sur le contrôle de l'intensité de neige mesurée par la balance, et de diminuer les variations de la température de l'air de façon à accroître la performance du système. Une deuxième série de 51 essais a eu lieu en ajoutant des améliorations apportées lors de la première série. Après avoir analysé les résultats de la deuxième série, une troisième série de neuf essais a été effectuée et elle inclut la mesure de la température du fluide. Une dernière série de 10 essais a été faite en utilisant un réfractomètre afin de mesurer la concentration en propylène glycol du fluide durant l'essai.

Les résultats des essais de la première série ne sont pas pris en considération, car les valeurs mesurées sont altérées par les différentes modifications du montage. Les essais de la deuxième série sont nommés essais principaux, et les essais des troisième et quatrième séries sont nommés essais complémentaires, car ils apportent de l'information sur la température du fluide et la concentration du fluide.

Les paramètres des essais principaux présentés et analysés dans cette section sont : l'intensité et la masse de neige, les températures de l'air et de la plaque, la puissance de chauffage, le temps d'endurance et le nombre adimensionnel ISTDN (Indoor Snow Test

Dimensionless Number). Ce nombre est basé sur la masse de neige accumulée et la masse de fluide et il se définit comme suit :

$$ISTDN = \frac{m_{snow}}{m_{fluid}} = \frac{IA_{plaque} t}{(C_{water} \rho_{water} + C_{glycol} \rho_{glycol}) V_{fluid}} \quad \text{Équation 7}$$

Et pour les essais complémentaires, les mêmes paramètres sont présentés en plus de la température et la concentration du fluide.

Les résultats sont présentés sous forme de moyennes fixes effectuées aux 30 secondes pour éliminer les petites fluctuations des paramètres induites par le système de contrôle de température de la chambre climatique.

Les enregistrements de puissance et de températures réalisés à l'aide des thermocouples installés dans la chambre pour les températures de l'air, de la plaque et de fluide sont analysés afin d'observer tous les phénomènes thermiques visibles et de constater les différences entre les diverses températures et puissances fournies à l'élément chauffant selon les conditions climatiques utilisées durant les essais.

3.1 Évolution des précipitations durant un essai

Les photos présentées dans cette section sont prises lors d'un essai effectué à une intensité de 25 g/dm²/h et une température de -5 °C. Elles présentent le déroulement de l'essai. La photo de la **Figure 21**, prise à la cinquième minute du début de l'essai, montre qu'une fraction de la neige qui entre en contact avec le fluide s'y accumule et que l'autre fraction fond et s'y diffuse.

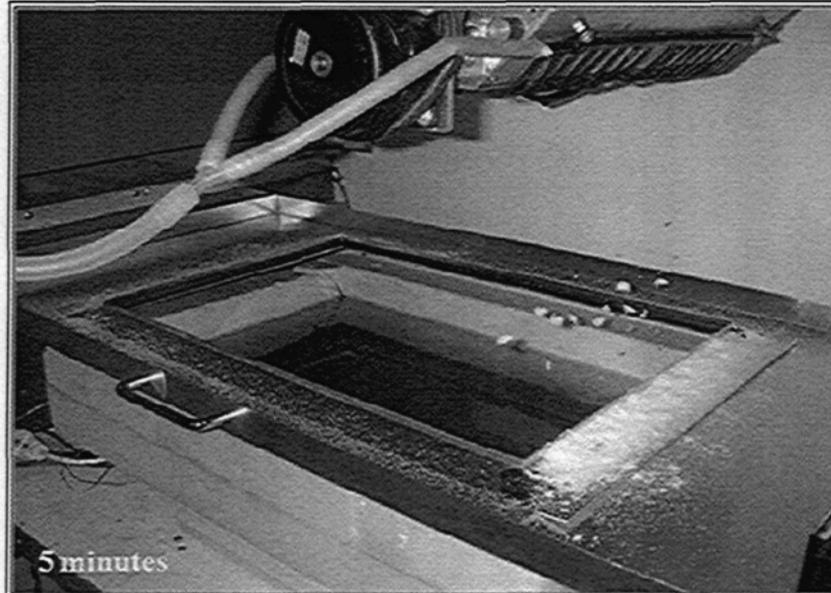


Figure 21 : Photo de l'évolution de l'absorption de neige par le fluide durant l'essai

La photo présentée à la Figure 22 est prise à la 90^e minute, le fluide antigivre a reçu 563,7 g de neige, et il a toujours son pouvoir antigivre.

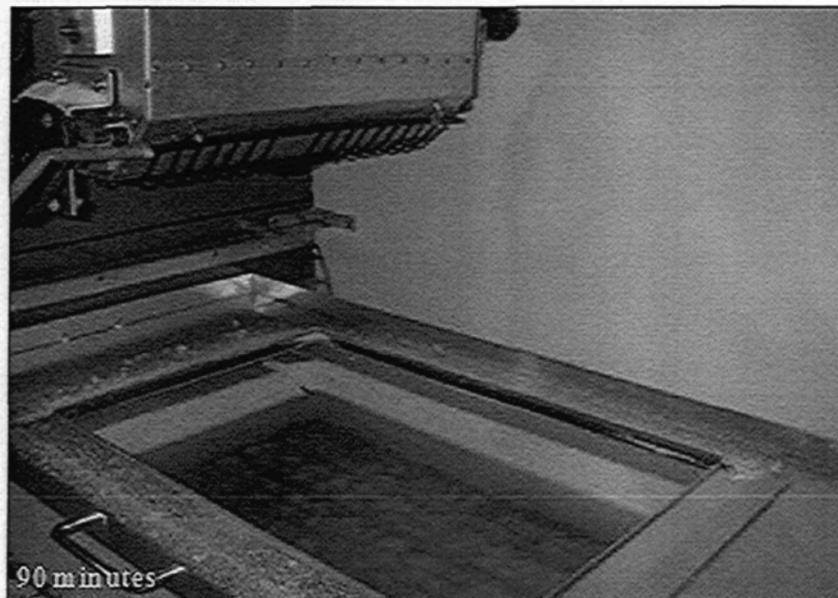


Figure 22 : Photo de l'évolution de l'absorption de neige par le fluide

La photo présentée à la **Figure 23** est prise à la 130^e minute, le fluide antigivre a reçu 803,6 g de neige, et il a toujours son pouvoir antigivre en dépit du fait que la neige non fondue forme de la slush.

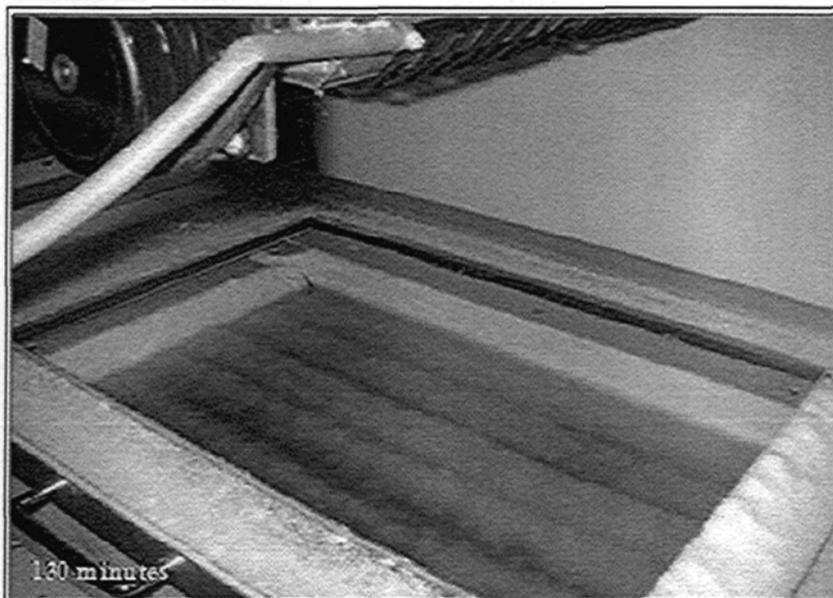


Figure 23 : Photo de l'évolution de l'absorption de neige par le fluide

La photo présentée à la **Figure 24** est prise à la 161^e minute, le fluide antigivre a reçu 995,7 g de neige. À ce moment, la neige commence à s'accumuler à la surface du fluide. Lorsque la surface du fluide est recouverte par 30 % de neige, ce qui se produit à la 161^e minute, le fluide a atteint l'échec.

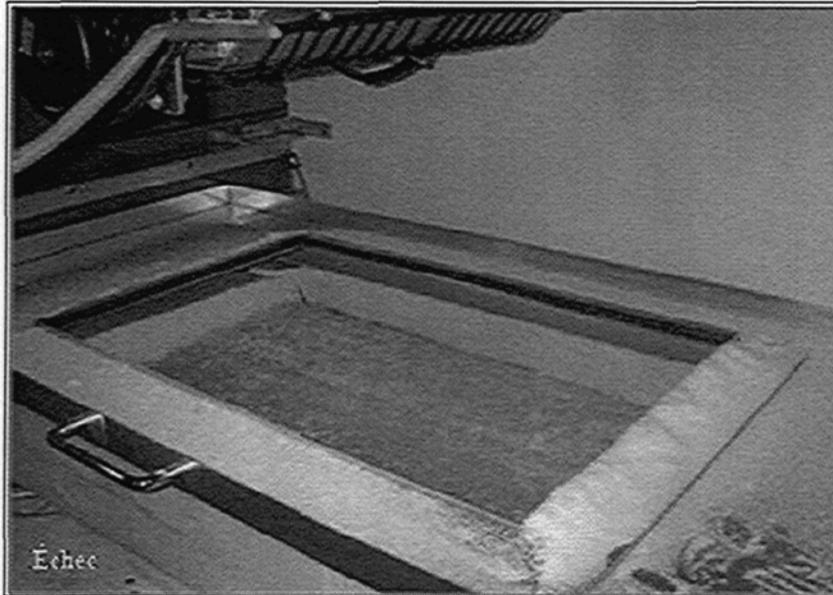


Figure 24 : Photo de l'évolution de l'absorption de neige par le fluide lors de l'échec

3.2 Essais principaux

Les résultats des essais de la première série, réalisée pour différentes valeurs de température et d'intensité sont présentés dans cette section. Il y a deux types de graphiques qui sont présentés : un qui présente l'évolution avec le temps de la puissance et des températures de l'air de la chambre et de la plaque, et l'autre qui présente les enregistrements de la masse de neige déposée sur le fluide et de l'intensité des précipitations. Pour chaque condition, deux essais ont été effectués; un est présenté dans cette section et l'autre à l'Annexe A.

3.2.1 Intensité de 10 g/dm²/h

Les essais effectués à des intensités de 10 g/dm²/h pour les conditions 1 à 4 correspondant aux températures de -5 °C, -10 °C, -14 °C et -25 °C sont présentés dans les prochaines sections.

3.2.1.1 Température de l'air de -5 °C et de la plaque de -4,2 °C

La condition 1 est effectuée à une intensité de 10 g/dm²/h à une température de l'air de -5 °C et une température de plaque de -4,2 °C, avec un cylindre à petits et à gros trous pour la boîte à neige.

– Boîte à neige avec de petits trous

La **Figure 25** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque et de la puissance fournie pour l'essai SNWIL071 et la **Figure 26** présente l'évolution de la masse et de l'intensité en fonction du temps, pour un cylindre à petits trous.

Comme le montre la **Figure 25**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de -5,9 °C avec de petites fluctuations régulières tout au long de l'essai et une incertitude de 0,3 °C. La température de la plaque débute à -5 °C, décroît rapidement à une valeur minimale de -5,3 °C, après le versage du fluide, en raison de la température du fluide qui est à la température de la chambre (-6,1 °C). Cette diminution de température est compensée par une augmentation de puissance pour ramener la température de la plaque à -4,2 °C; la puissance atteint sa valeur maximale (1,2 W/dm²), les courbes de température de la plaque et de la puissance ont presque la même allure au cours de l'essai. Durant les 167 premières minutes le système est dans le régime transitoire, où la température de la plaque oscille autour d'une valeur moyenne de -4,4 °C, tandis que la puissance oscille autour de 0,8 W/dm², car le système de contrôle de la plaque tend à stabiliser la température de la plaque à -4,2 °C. Lorsque la température de la plaque est stabilisée, elle oscille autour de -4,6 °C durant 178 minutes, tandis que la valeur de la puissance demeure à une valeur

moyenne de $0,3 \text{ W/dm}^2$ durant le même intervalle de temps. Lorsque le fluide atteint son temps d'endurance, qui est de 345,48 minutes, la puissance est presque nulle et la température de la plaque tend vers une valeur constante de $-4,6 \text{ }^\circ\text{C}$. L'écart de la température moyenne entre la plaque et l'air est de $1,4 \text{ }^\circ\text{C}$.

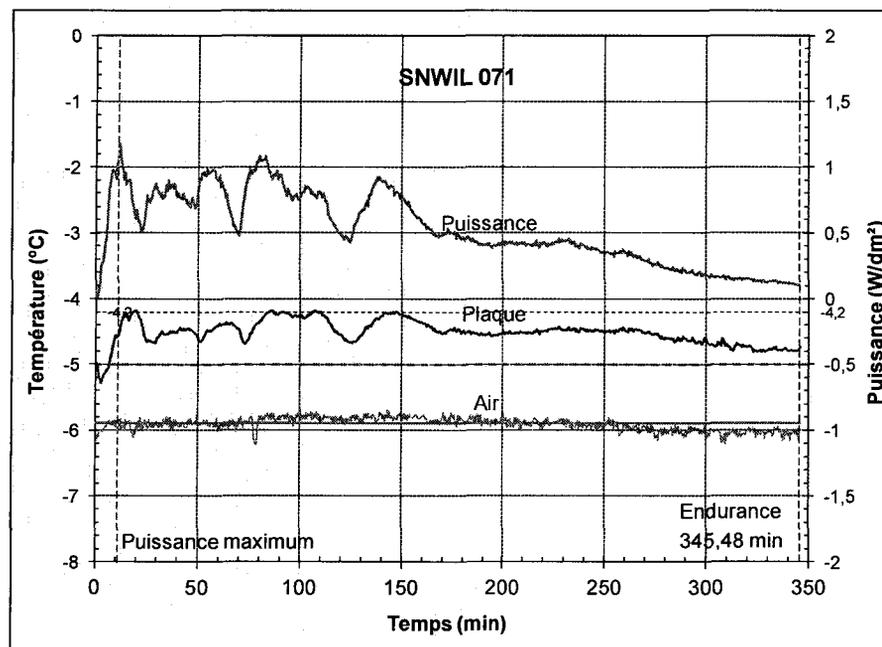


Figure 25 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 1 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL071

Le pic observé entre la 70^e et la 80^e minute (diminution de $0,4 \text{ }^\circ\text{C}$) dans la courbe de température de l'air n'est pas lié à l'expérience, mais induit par une variation de la référence du thermocouple.

La courbe de la masse représente la masse de neige cumulative qui tombe sur le fluide tout au long de l'essai (Figure 26). Cette masse qui augmente linéairement avec le temps correspond à l'intensité des précipitations de neige qui est constante durant un essai.

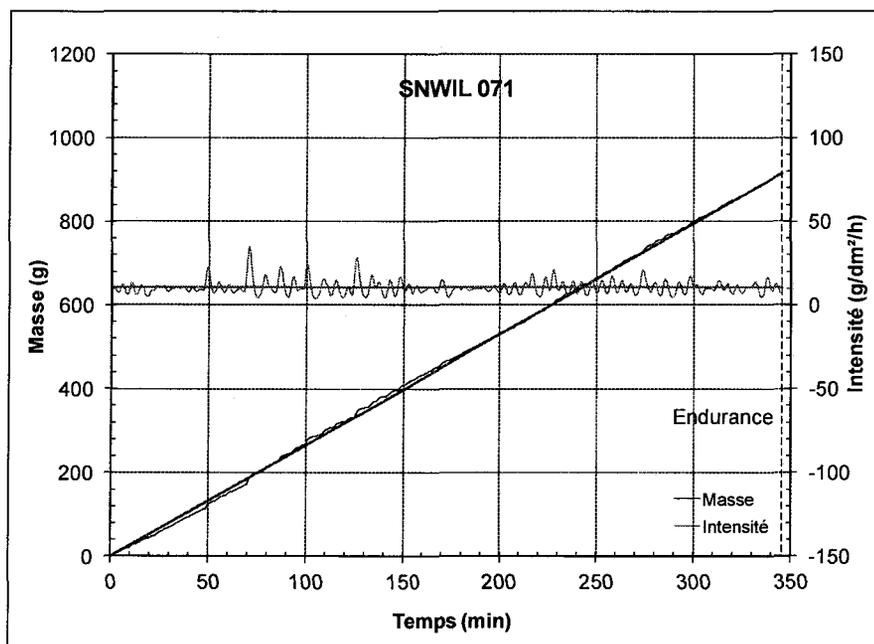


Figure 26 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 1 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL071

La masse totale cumulée durant 345,48 minutes est de 915,3 g et correspond à une intensité moyenne de $10,6 \pm 15,5$ g/dm²/h. Les petits pics observés sont les fluctuations du système de contrôle des précipitations pour maintenir une intensité constante en raison de la position des trous sur le cylindre qui ne sont pas disposés symétriquement, tandis que les gros pics observés sur la courbe d'intensité des précipitations représentent un réajustement ponctuel du système de contrôle des précipitations pour maintenir une intensité constante induite probablement par une variation de la densité de la neige.

– Boîte à neige avec de gros trous

La **Figure 27** et la **Figure 28** correspondent à l'essai SNWIL077 effectué avec un cylindre à gros trous.

Comme on peut le voir à la **Figure 27**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de $-5,4\text{ °C}$ avec de petites fluctuations régulières tout au long de l'essai et une incertitude de $0,5\text{ °C}$. La température de la plaque débute à $-4,8\text{ °C}$, en raison de la température du fluide versé, qui est à la température de la chambre ($-5,3\text{ °C}$). Cette diminution de température est compensée par une augmentation de puissance pour ramener la température de la plaque à $-4,2\text{ °C}$; la puissance atteint sa valeur maximale ($1,36\text{ W/dm}^2$), les courbes de température de la plaque et de la puissance ont presque la même allure au cours de l'essai. Durant les 50 premières minutes le système est dans le régime transitoire, où la température de la plaque oscille autour d'une valeur moyenne de $-4,3\text{ °C}$, tandis que la puissance oscille autour de $0,7\text{ W/dm}^2$. Par la suite, la température de la plaque demeure presque constante à une valeur de $-4,3\text{ °C}$ durant 216 minutes, tandis que la valeur de la puissance diminue lentement autour d'une moyenne de $0,5\text{ W/dm}^2$ durant le même intervalle de temps. Lorsque le fluide atteint son temps d'endurance, qui est de 266,43 minutes, la puissance est de $0,2\text{ W/dm}^2$ et la température de la plaque tend vers une valeur constante de $-4,6\text{ °C}$. L'écart de la température moyenne entre la plaque et l'air est de $1,1\text{ °C}$.

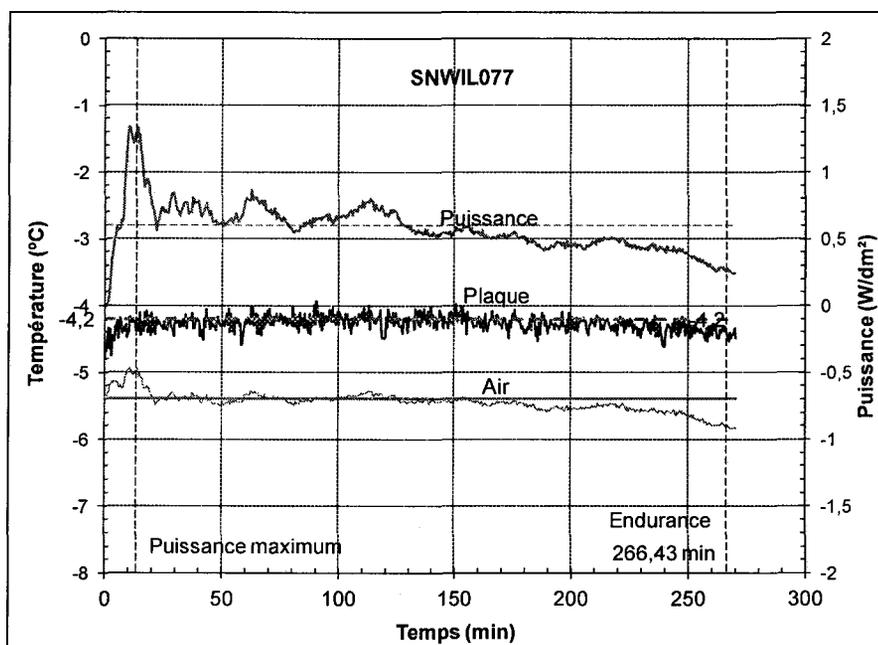


Figure 27 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 1 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL077

La courbe de la masse représente la masse de neige cumulative qui tombe sur le fluide tout au long de l'essai (**Figure 28**). Cette masse qui augmente linéairement avec le temps correspond à l'intensité des précipitations de neige qui est constante durant un essai.

La masse totale cumulée durant 266,43 minutes est de 677,3 g et correspond à une intensité moyenne de $10,0 \pm 8,3$ g/dm²/h. Les petits pics observés sont les fluctuations du système de contrôle des précipitations pour maintenir une intensité constante (pour plus de détails, voir la section 3.2.1.1 pour une boîte à petits trous).

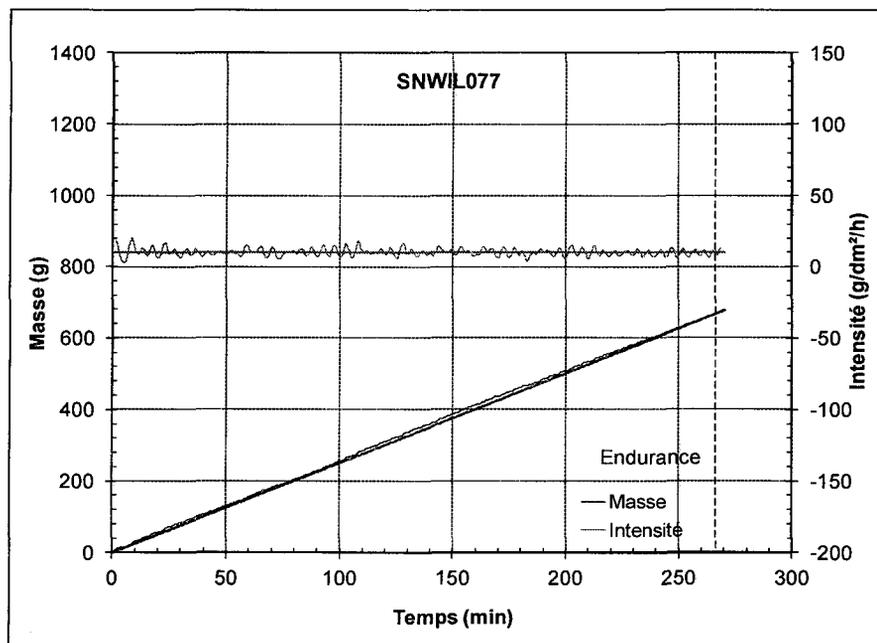


Figure 28 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 1 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL077

3.2.1.2 Température de l'air de -10 °C et de la plaque de -11,2 °C

La condition 2 est effectuée à une intensité de 10 g/dm²/h à une température de l'air de -10 °C et une température de plaque de -11,2 °C, avec un cylindre à petits et gros trous pour la boîte à neige.

– Boîte à neige avec de petits trous

La **Figure 29** et la **Figure 30** correspondent à l'essai SNWIL060 effectué avec un cylindre à petits trous.

Comme on peut le voir à la **Figure 29**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de -11,0 °C avec de petites fluctuations régulières tout au long de l'essai et une variation de 0,2 °C. La température de la plaque débute à -9,3 °C, en raison

de la température du fluide versé, qui est à la température de la chambre ($-11,1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Cette diminution de température est compensée par une augmentation de puissance pour ramener la température de la plaque à $-11,2\text{ }^{\circ}\text{C}$; la puissance atteint sa valeur maximale ($0,7\text{ W/dm}^2$). Durant les 40 premières minutes le système est dans le régime transitoire, où la température de la plaque oscille autour d'une valeur moyenne de $-9,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, tandis que la puissance oscille autour de $0,3\text{ W/dm}^2$. Par la suite, la température de la plaque demeure presque constante à une valeur de $-9,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ durant 88 minutes, tandis que la valeur de la puissance diminue lentement autour d'une moyenne de $0,2\text{ W/dm}^2$ durant le même intervalle de temps. Lorsque le fluide atteint son temps d'endurance, qui est de 128,7 minutes, la puissance est nulle et la température de la plaque tend vers une valeur constante de $-9,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'écart de la température moyenne entre la plaque et l'air est de $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

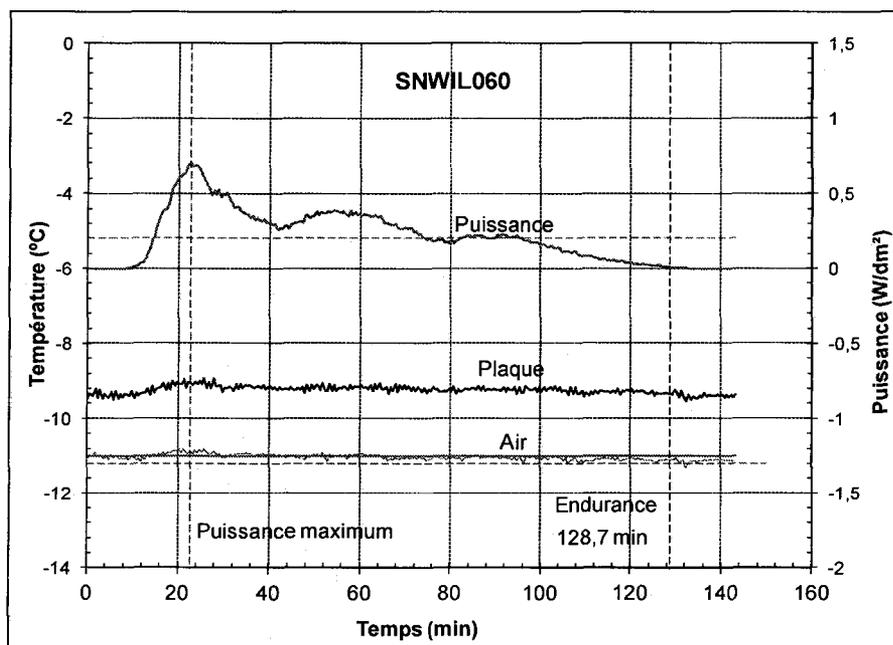


Figure 29 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 2 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL060

La courbe de la masse représente la masse de neige cumulative qui tombe sur le fluide tout au long de l'essai (**Figure 30**). Cette masse qui augmente linéairement avec le temps correspond à l'intensité des précipitations de neige qui est constante durant un essai.

La masse totale cumulée durant 128,7 minutes est de 343,2 g et correspond à une intensité moyenne de $10,7 \pm 10,0$ g/dm²/h. Les petits pics observés sont les fluctuations du système de contrôle des précipitations pour maintenir une intensité constante (pour plus de détails, voir la section 3.2.1.1 pour une boîte à petits trous).

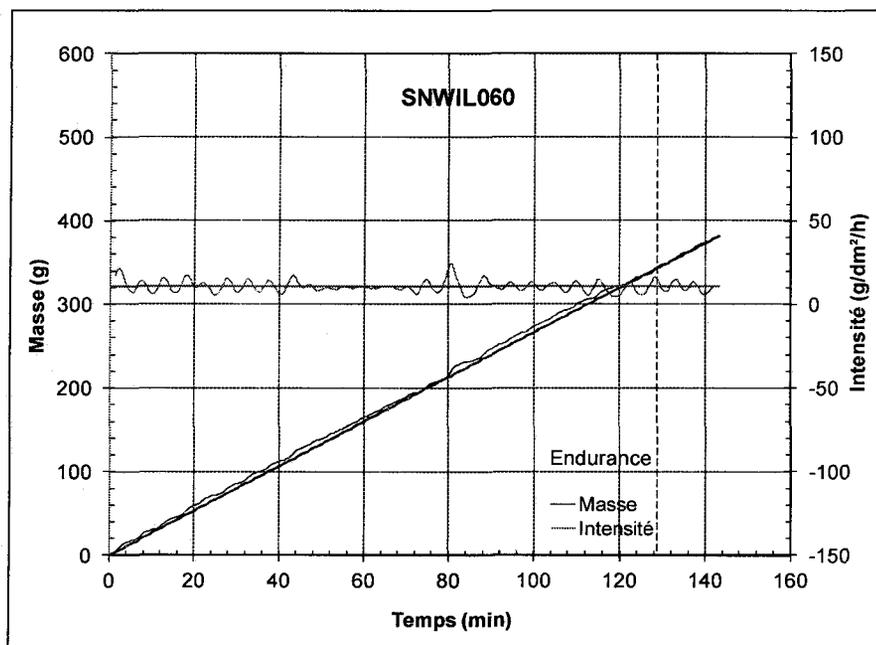


Figure 30 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 2 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL060

– Boîte à neige avec de gros trous

La **Figure 31** et la **Figure 32** correspondent à l'essai SNWIL058 effectué avec un cylindre à gros trous.

Comme le montre la **Figure 31**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de $-10,9\text{ °C}$ avec de petites fluctuations régulières tout au long de l'essai et une incertitude de $0,2\text{ °C}$. La température de la plaque débute à $-9,5\text{ °C}$, décroît rapidement à une valeur minimale de $-11,2\text{ °C}$, après le versage du fluide, en raison de la température du fluide qui est à la température de la chambre ($-11,1\text{ °C}$).

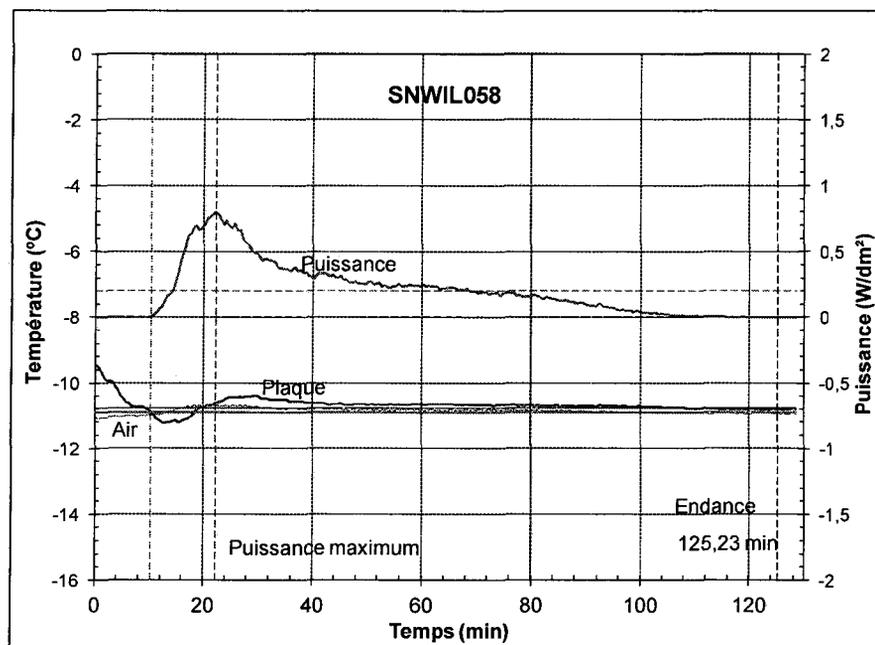


Figure 31 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 2 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL058

Cette diminution de température est compensée par une augmentation de puissance qui atteint sa valeur maximale ($0,8\text{ W/dm}^2$). Durant les 46 premières minutes le système est dans le régime transitoire, où la température de la plaque oscille autour d'une valeur moyenne de $-10,6\text{ °C}$, tandis que la puissance oscille autour de $0,3\text{ W/dm}^2$, car le système de contrôle de la plaque tend à stabiliser la température de la plaque à $-11,2\text{ °C}$. Lorsque la température de la plaque est stabilisée, elle oscille autour de $-10,7\text{ °C}$ durant 79 minutes,

tandis que la valeur de la puissance diminue lentement autour d'une moyenne de $0,1 \text{ W/dm}^2$ durant le même intervalle de temps. Lorsque le fluide atteint son temps d'endurance, qui est de 125,23 minutes, la puissance est nulle et la température de la plaque tend vers une valeur constante de $-10,8 \text{ }^\circ\text{C}$. L'écart de la température moyenne entre la plaque et l'air est de $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

La **Figure 32** représente la masse de neige cumulative qui tombe sur le fluide tout au long de l'essai. Cette masse qui augmente linéairement avec le temps correspond à l'intensité des précipitations de neige qui est constante durant un essai.

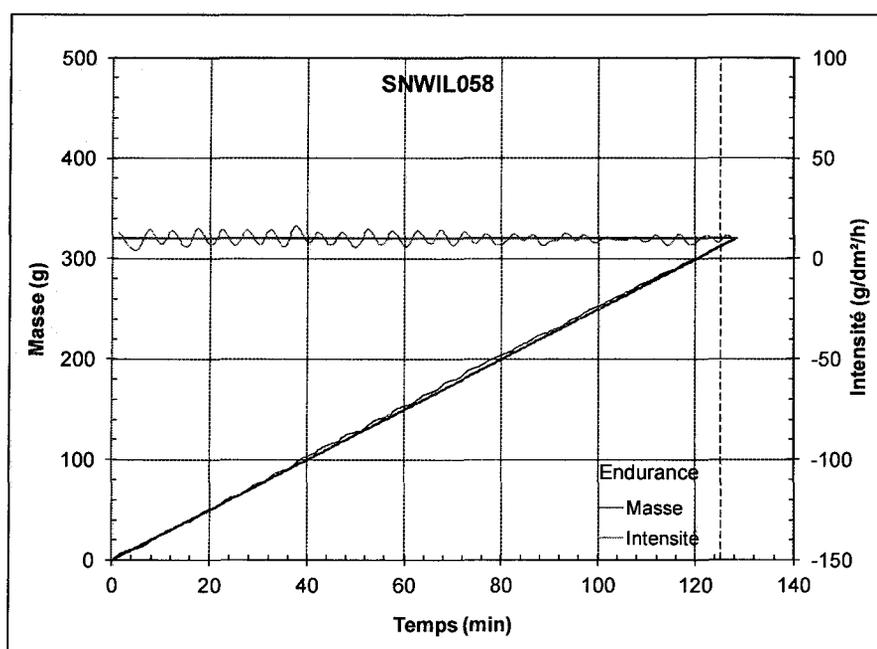


Figure 32 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 2 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL058

La masse totale cumulée durant 125,23 minutes est de 312,4 g et correspond à une intensité moyenne de $9,9 \pm 6,2 \text{ g/dm}^2/\text{h}$. Les petits pics observés sont les fluctuations du système de

contrôle des précipitations pour maintenir une intensité constante (pour plus de détails, voir la section 3.2.1.1 pour une boîte à petits trous).

3.2.1.3 Température de l'air de -14 °C et de la plaque de -15,2 °C

La condition 3 est effectuée à une intensité de 10 g/dm²/h à une température de l'air de -14 °C et une température de plaque de -15,2 °C, avec un cylindre à petits et gros trous pour la boîte à neige.

– Boîte à neige avec de petits trous

La **Figure 33** et la **Figure 34** correspondent à l'essai SNWIL069 effectué avec un cylindre à petits trous.

Comme le montre la **Figure 33**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de -15,2 °C avec de petites fluctuations régulières tout au long de l'essai et une incertitude de 0,3 °C. La température de la plaque débute à -13,6 °C, décroît rapidement à une valeur minimale de -14,7 °C, après le versage du fluide, en raison de la température du fluide qui est à la température de la chambre (-15,3 °C). Cette diminution de température est compensée par une augmentation de puissance pour ramener la température de la plaque à -15,2 °C; la puissance atteint sa valeur maximale (0,5 W/dm²). Durant les 40 premières minutes le système est dans le régime transitoire, où la température de la plaque oscille autour d'une valeur moyenne de -14,3 °C, tandis que la puissance oscille autour de 0,2 W/dm², car le système de contrôle de la plaque tend à stabiliser la température de la plaque à -15,2 °C. Lorsque la température de la plaque est stabilisée, elle oscille autour de -14,3 °C durant 37 minutes, tandis que la valeur de la puissance diminue lentement autour

d'une moyenne de $0,1 \text{ W/dm}^2$ durant le même intervalle de temps. Lorsque le fluide atteint son temps d'endurance, qui de 77,6 minutes la puissance est nulle et la température de la plaque tend vers une valeur constante de $-14,3 \text{ }^\circ\text{C}$. L'écart de la température moyenne entre la plaque et l'air est de $0,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

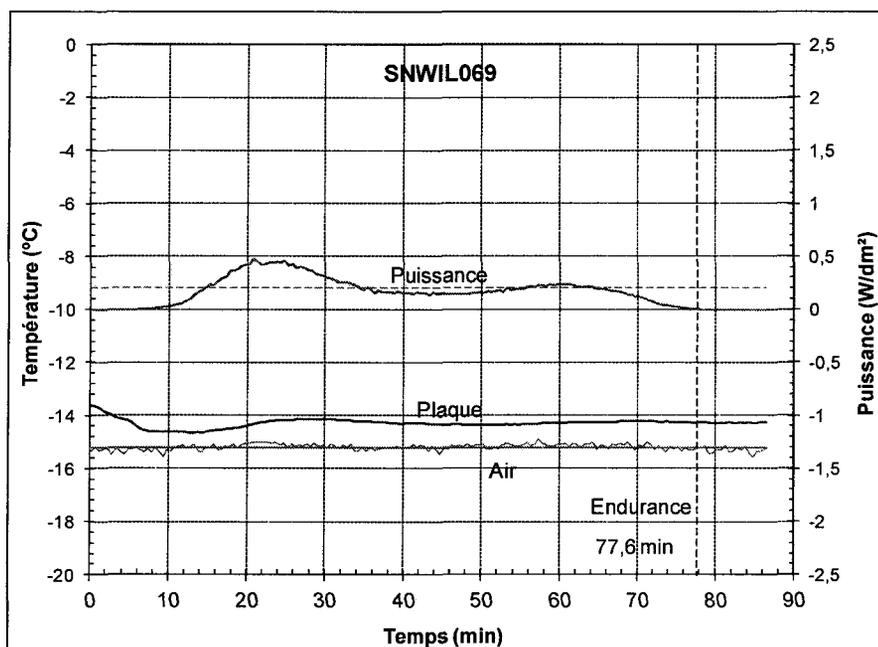


Figure 33 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 3 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL069

La courbe de la masse représente la masse de neige cumulative qui tombe sur le fluide tout au long de l'essai (**Figure 34**). Cette masse qui augmente linéairement avec le temps correspond à l'intensité des précipitations de neige qui est constante durant un essai.

La masse totale cumulée durant 77,6 minutes est de 201,6 g et correspond à une intensité moyenne de $10,4 \pm 9,2 \text{ g/dm}^2/\text{h}$. Les petits pics observés sont les fluctuations du système de contrôle des précipitations pour maintenir une intensité constante (pour plus de détails, voir la section 3.2.1.1 pour une boîte à petits trous).

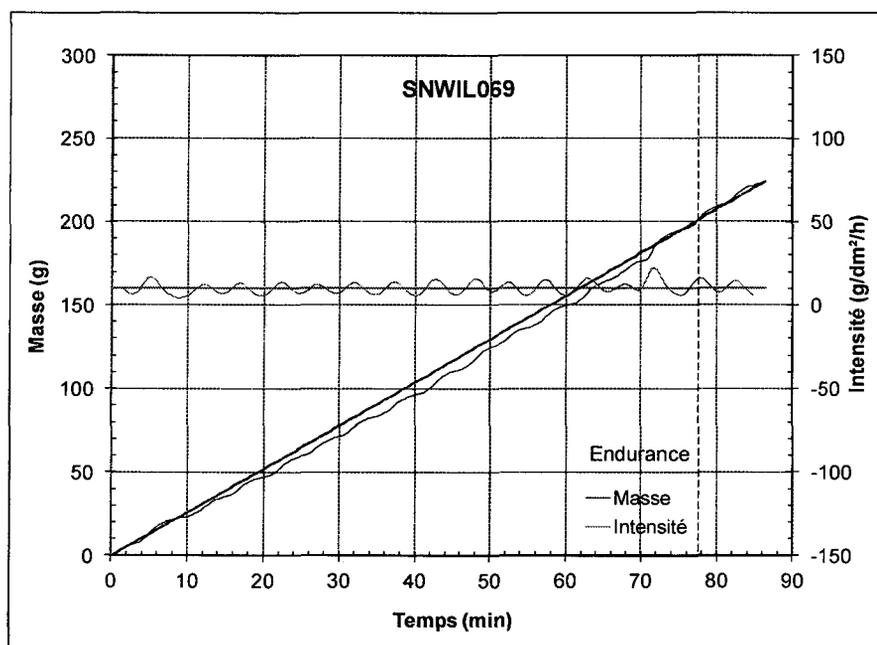


Figure 34 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 3 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL069

– Boîte à neige avec de gros trous

La Figure 35 et la Figure 36 correspondent à l'essai SNWIL067 effectué avec un cylindre à gros trous.

Comme on peut le voir à la Figure 35, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de $-15,2\text{ °C}$ avec de petites fluctuations régulières tout au long de l'essai et une incertitude de $0,3\text{ °C}$. La température de la plaque débute à $-13,9\text{ °C}$, en raison de la température du fluide versé, qui est à la température de la chambre ($-15,1\text{ °C}$). Cette diminution de température est compensée par une augmentation de puissance pour ramener la température de la plaque à $-15,2\text{ °C}$, la puissance atteint sa valeur maximale ($0,6\text{ W/dm}^2$). Durant les 40 premières minutes le système est dans le régime transitoire, où

la température de la plaque oscille autour d'une valeur moyenne de $-14,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, tandis que la puissance oscille autour de $0,2\text{ W/dm}^2$. Par la suite, la température de la plaque demeure presque constante à une valeur de $-14,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ durant 34 minutes, tandis que la valeur de la puissance diminue lentement autour d'une moyenne de $0,02\text{ W/dm}^2$ durant le même intervalle de temps. Lorsque le fluide atteint son temps d'endurance, qui est de 74,5 minutes, la puissance est nulle et la température de la plaque tend vers une valeur constante de $-14,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'écart de la température moyenne entre la plaque et l'air est de $0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

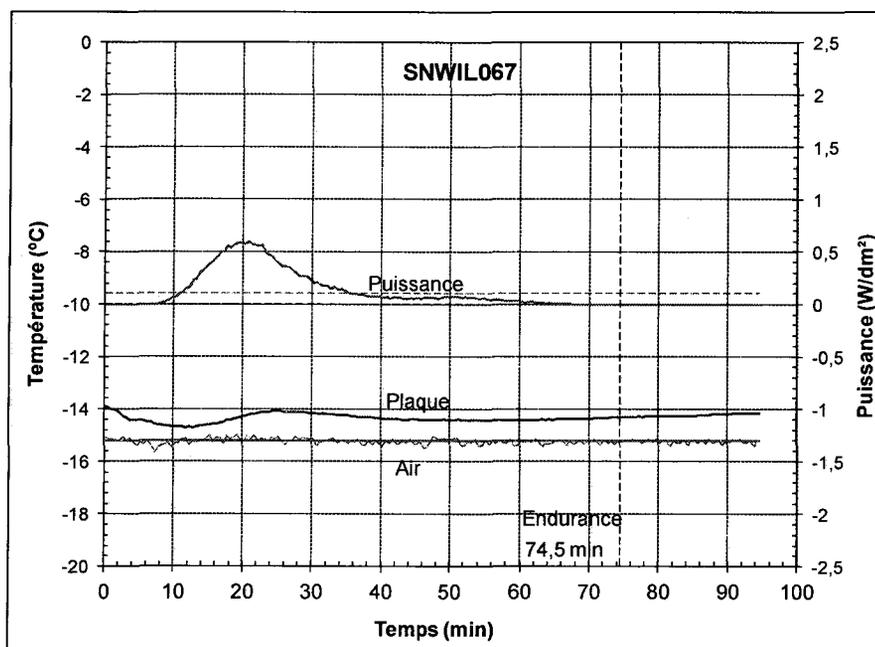


Figure 35 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 3 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL067

La courbe de la masse représente la masse de neige cumulative qui tombe sur le fluide tout au long de l'essai (**Figure 36**). Cette masse qui augmente linéairement avec le temps correspond à l'intensité des précipitations de neige qui est constante durant un essai.

La masse totale cumulée durant 74,5 minutes est de 184,4 g et correspond à une intensité moyenne de $9,9 \pm 3,4$ g/dm²/h. Les petits pics observés sont les fluctuations du système de contrôle des précipitations pour maintenir une intensité constante (pour plus de détails, voir la section 3.2.1.1 pour une boîte à petits trous).

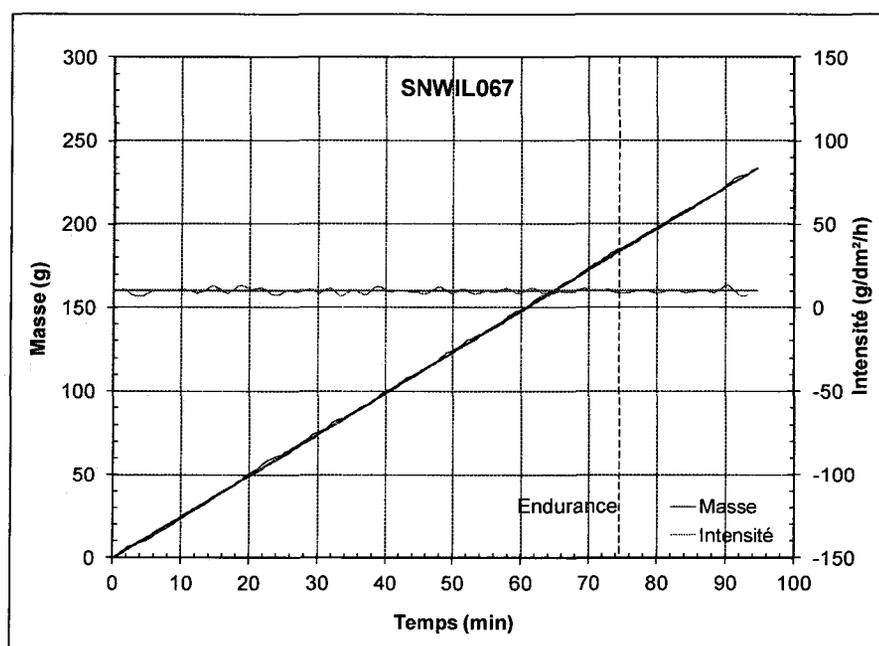


Figure 36 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 3 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL067

3.2.1.4 Température de l'air de -25 °C et de la plaque de -26,2 °C

La condition 4 est effectuée à une intensité de 10 g/dm²/h à une température de l'air de -25 °C et une température de plaque de -26,2 °C, avec un cylindre à petits et gros trous pour la boîte à neige.

– Boîte à neige avec de petits trous

La **Figure 37** et la **Figure 38** correspondent à l'essai SNWIL047 effectué avec un cylindre à petits trous.

Comme le montre la **Figure 37**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de $-25,8\text{ °C}$ avec de légères fluctuations tout au long de l'essai et une incertitude de $0,1\text{ °C}$. La température de la plaque débute à $-22,6\text{ °C}$ et reste constante avec une valeur moyenne de $-22,5\text{ °C}$. La puissance fournie à la plaque est nulle tout au long de l'essai.

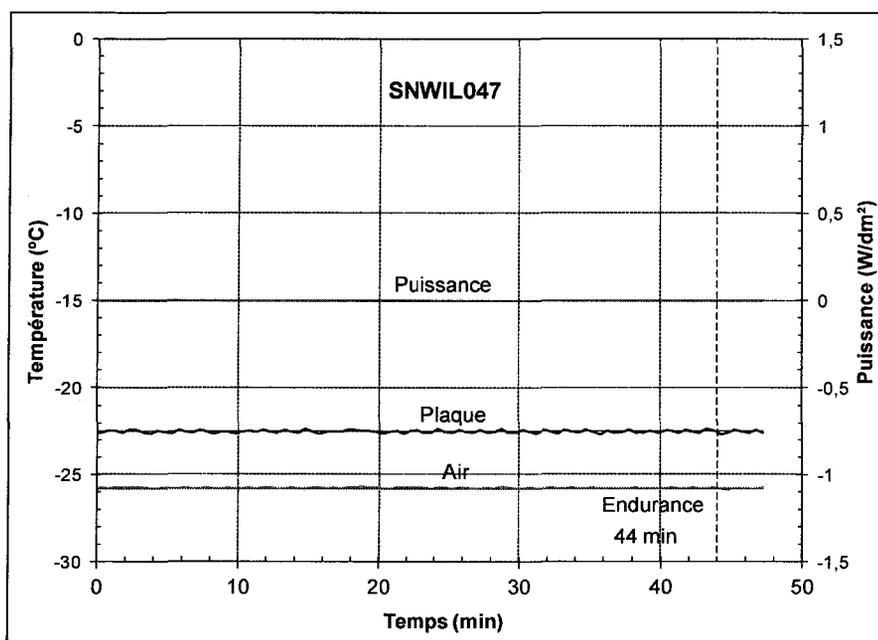


Figure 37 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 4 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL047

La courbe de la masse représente la masse de neige cumulative qui tombe sur le fluide tout au long de l'essai (**Figure 38**). Cette masse qui augmente linéairement avec le temps correspond à l'intensité des précipitations de neige qui est constante durant un essai.

La masse totale cumulée durant 44 minutes est de 108,7 g et correspond à une intensité moyenne de $9,7 \pm 7,8$ g/dm²/h. Les petits pics observés sont les fluctuations du système de contrôle des précipitations pour maintenir une intensité constante (pour plus de détails, voir la section 3.2.1.1 pour une boîte à petits trous).

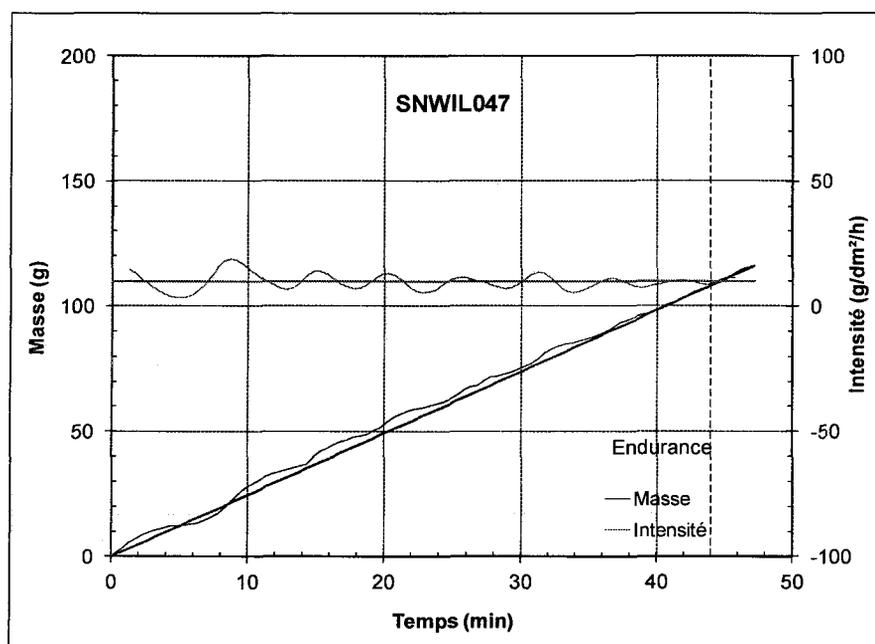


Figure 38 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 4 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL047

– Boîte à neige avec de gros trous

La Figure 39 et la Figure 40 correspondent à l'essai SNWIL049 effectué avec un cylindre à gros trous.

Comme on peut le voir à la Figure 39, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de $-25,7$ °C avec de légères fluctuations tout au long de l'essai et une incertitude de $0,1$ °C. La température de la plaque débute à $-22,5$ °C et reste

constante avec une valeur moyenne de $-22,5\text{ °C}$. La puissance fournie à la plaque est nulle tout au long de l'essai.

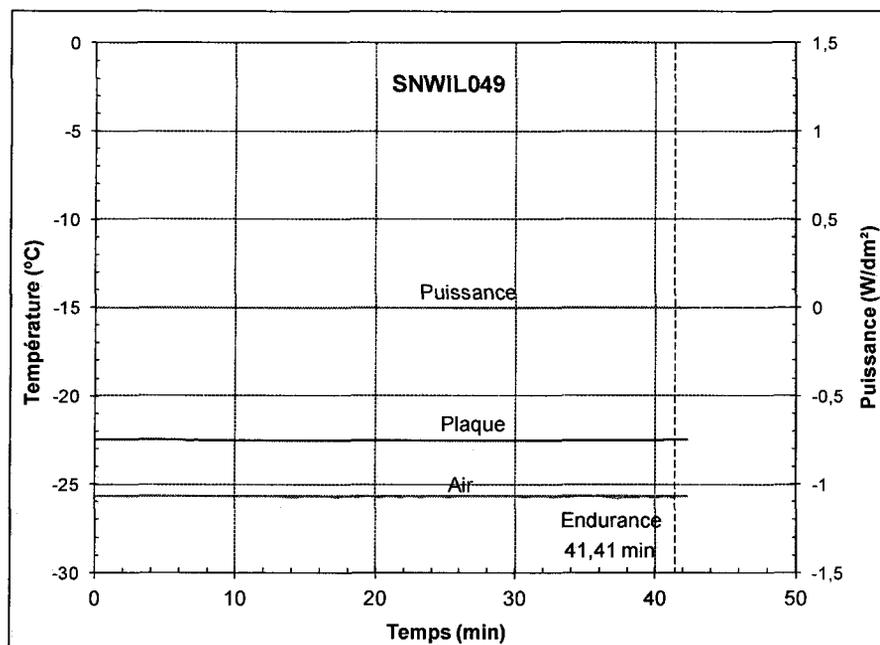


Figure 39 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 4 avec une boîte à neige à gros trous, SNWIL049

La courbe de la masse représente la masse de neige cumulative qui tombe sur le fluide tout au long de l'essai (**Figure 39**). Cette masse qui augmente linéairement avec le temps correspond à l'intensité des précipitations de neige qui est constante durant un essai.

La masse totale cumulée durant 41,41 minutes est de 113,8 g et correspond à une intensité moyenne de $10,7 \pm 15,6\text{ g/dm}^2/\text{h}$. Les pics observés sont les fluctuations du système de contrôle des précipitations pour maintenir une intensité constante (pour plus de détails, voir la section 3.2.1.1 pour une boîte à petits trous).

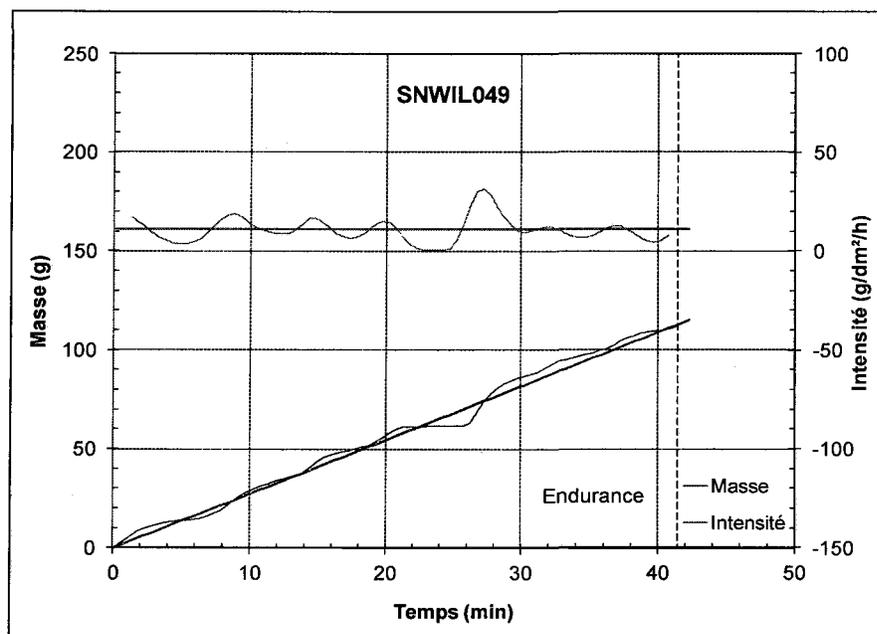


Figure 40 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 4 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL049

3.2.2 Intensité de 25 g/dm²/h

Les essais effectués à des intensités de 25 g/dm²/h pour les conditions 5 à 8 correspondant aux températures de -5 °C, -10 °C, -14 °C et -25 °C sont présentés dans les prochaines sections.

3.2.2.1 Température de l'air de -5 °C et de la plaque de -5,1 °C

La condition 5 est effectuée à une intensité de 25 g/dm²/h à une température de l'air de -5 °C et une température de plaque de -5,1 °C, avec un cylindre à petits et gros trous pour la boîte à neige.

– **Boîte à neige avec de petits trous**

La **Figure 41** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque et la puissance fournie pour l'essai SNWIL072 et la **Figure 42** présente l'évolution de la masse et de l'intensité en fonction du temps pour un cylindre à petits trous.

Comme le montre la **Figure 41**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de $-5,7\text{ °C}$ avec de petites fluctuations régulières tout au long de l'essai et une incertitude de $0,3\text{ °C}$. La température de la plaque débute à $-4,5\text{ °C}$, décroît rapidement à une valeur minimale de $-5,6\text{ °C}$, après le versage du fluide, en raison de la température du fluide qui est à la température de la chambre ($-6,0\text{ °C}$). Cette diminution de température est compensée par une augmentation de puissance pour ramener la température de la plaque à $-5,1\text{ °C}$; la puissance atteint sa valeur maximale ($2,3\text{ W/dm}^2$), les courbes de température de la plaque et de la puissance ont presque la même allure au cours de l'essai. Durant les 20 premières minutes le système est dans le régime transitoire, où la température de la plaque oscille autour d'une valeur moyenne de $-4,2\text{ °C}$, tandis que la puissance oscille autour de $1,7\text{ W/dm}^2$, car le système de contrôle de la plaque tend à stabiliser la température de la plaque à $-4,2\text{ °C}$. Lorsque la température de la plaque est stabilisée, elle oscille autour de $-3,4\text{ °C}$ durant 64 minutes, tandis que la valeur de la puissance diminue lentement autour d'une moyenne de $1,5\text{ W/dm}^2$ durant le même intervalle de temps. Lorsque le fluide atteint son temps d'endurance, qui est de 114,8 minutes, la puissance est de $0,5\text{ W/dm}^2$ et la température de la plaque tend vers une valeur constante de $-4,8\text{ °C}$. L'écart de la température moyenne entre la plaque et l'air est de $1,8\text{ °C}$.

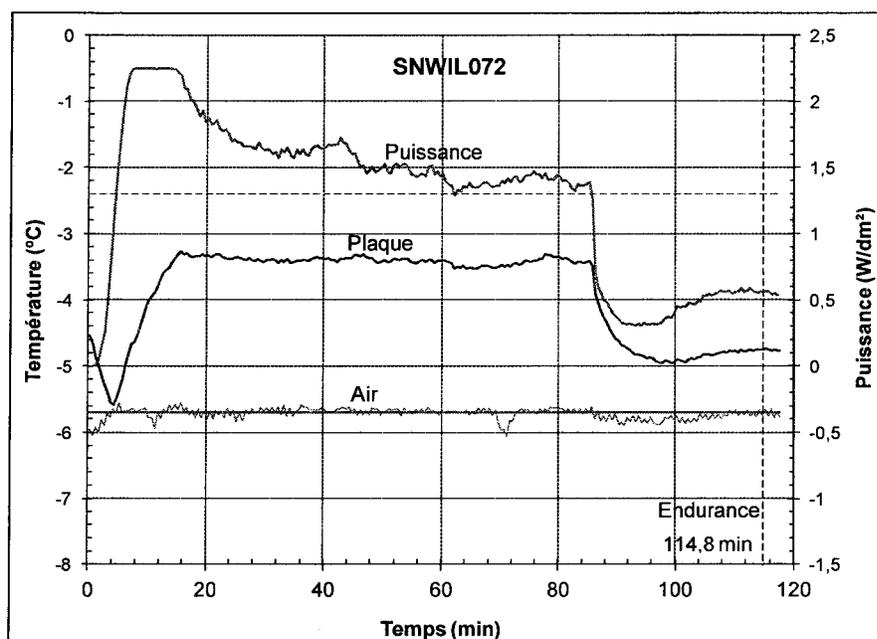


Figure 41 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 5 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL072

Le pic observé entre la 70^e et la 74^e minute (diminution de 0,6 °C) dans la courbe de température de l'air n'est pas lié à l'expérience, mais induit par une variation de la référence du thermocouple.

La courbe de la masse représente la masse de neige cumulative qui tombe sur le fluide tout au long de l'essai (**Figure 42**). Cette masse qui augmente linéairement avec le temps correspond à l'intensité des précipitations de neige qui est constante durant un essai.

La masse totale cumulée durant 114,8 minutes est de 371,7 g et correspond à une intensité moyenne de $25,4 \pm 14,7$ g/dm²/h. Les petits pics observés sont les fluctuations du système de contrôle des précipitations pour maintenir une intensité constante (pour plus de détails, voir la section 3.2.1.1 pour une boîte à petits trous).

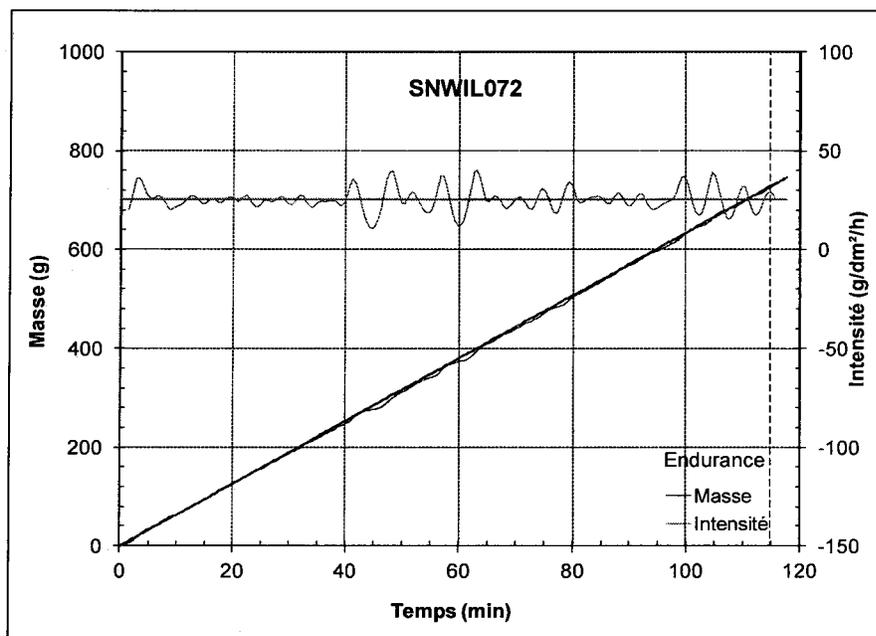


Figure 42 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 5 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL072

– Boîte à neige avec de gros trous

La Figure 43 et la Figure 44 correspondent à l'essai SNWIL075 effectué avec un cylindre à gros trous.

Comme le montre la Figure 43, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de $-5,5\text{ °C}$ avec de petites fluctuations régulières tout au long de l'essai et une incertitude de $0,4\text{ °C}$. La température de la plaque débute à $-5,4\text{ °C}$, en raison de la température du fluide versé, qui est à la température de la chambre ($-5,8\text{ °C}$). Cette diminution de température est compensée par une augmentation de puissance pour ramener la température de la plaque à $-5,1\text{ °C}$; la puissance atteint sa valeur maximale ($2,3\text{ W/dm}^2$), les courbes de température de la plaque et de la puissance ont presque la même allure au

cours de l'essai. Durant les 30 premières minutes le système est dans le régime transitoire, où la température de la plaque oscille autour d'une valeur moyenne de $-4,6\text{ °C}$, tandis que la puissance oscille autour de $1,6\text{ W/dm}^2$. Par la suite, la température de la plaque demeure presque constante à une valeur de $-4,3\text{ °C}$ durant 50 minutes, tandis que la valeur de la puissance diminue lentement autour d'une moyenne de $1,1\text{ W/dm}^2$ durant le même intervalle de temps. Lorsque le fluide atteint son temps d'endurance, qui est de 101,28 minutes, la puissance est de $0,5\text{ W/dm}^2$ et la température de la plaque tend vers une valeur constante de $-4,8\text{ °C}$. L'écart de la température moyenne entre la plaque et l'air est de $1,0\text{ °C}$.

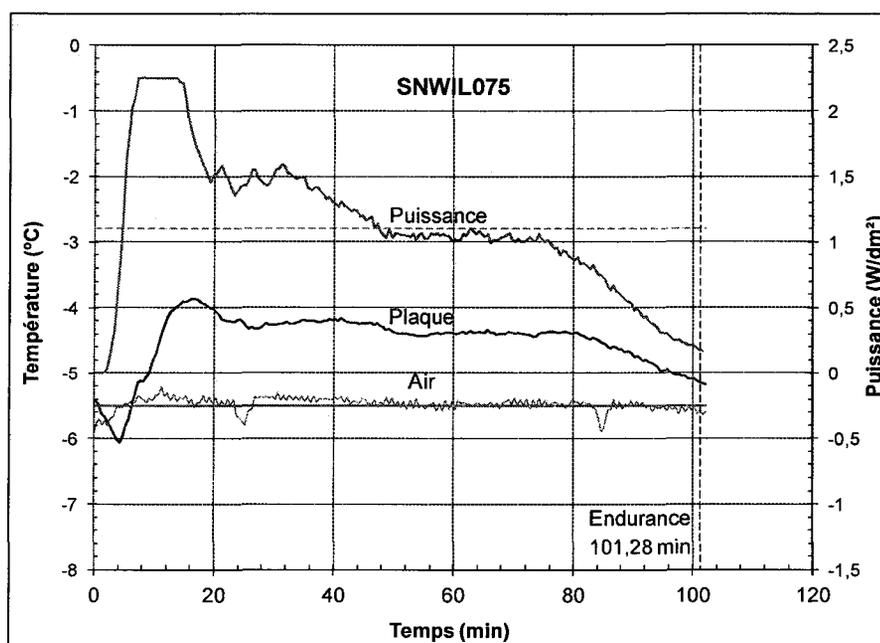


Figure 43 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 5 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL075

Les pics observés entre la 26^e et la 28^e minute et entre la 86^e et la 88^e minute (diminution de 0,6 °C) dans la courbe de température de l'air ne sont pas liés à l'expérience, mais sont induits par une variation de la référence du thermocouple.

La courbe de la masse représente la masse de neige cumulative qui tombe sur le fluide tout au long de l'essai (**Figure 44**). Cette masse qui augmente linéairement avec le temps correspond à l'intensité des précipitations de neige qui est constante durant un essai.

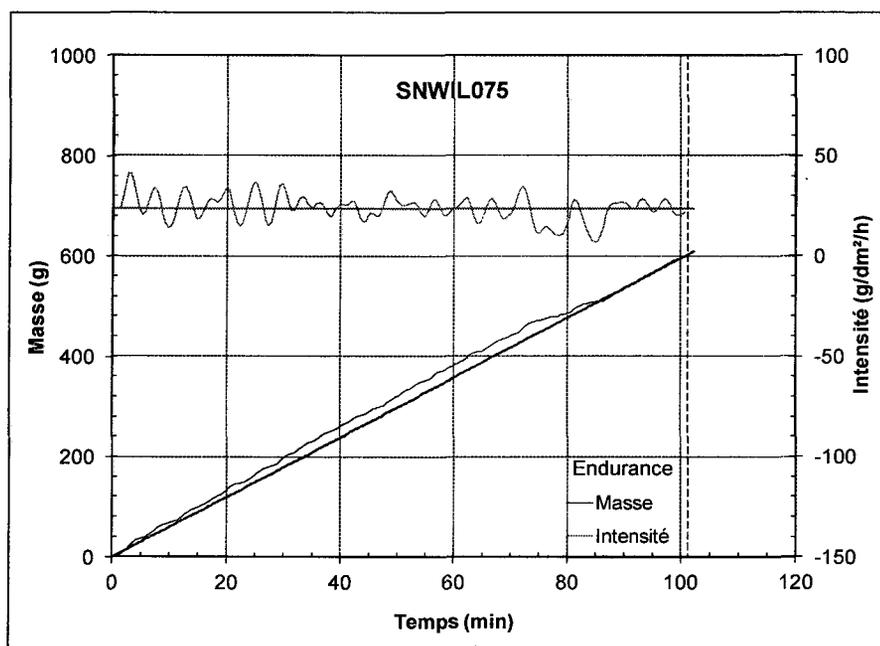


Figure 44 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 5 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL075

La masse totale cumulée durant 101,28 minutes est de 608,9 g et correspond à une intensité moyenne de $23,9 \pm 17,1$ g/dm²/h. Les petits pics observés sont les fluctuations du système de contrôle des précipitations pour maintenir une intensité constante (pour plus de détails, voir la section 3.2.1.1 pour une boîte à petits trous).

3.2.2.2 Température de l'air de -10 °C et de la plaque de -12,1 °C

La condition 6 est effectuée à une intensité de 25 g/dm²/h à une température de l'air de -10 °C et une température de plaque de -12,1 °C, avec un cylindre à petits et gros trous pour la boîte à neige

– Boîte à neige avec de petits trous

La **Figure 45** et la **Figure 46** correspondent à l'essai SNWIL042 effectué avec un cylindre à petits trous.

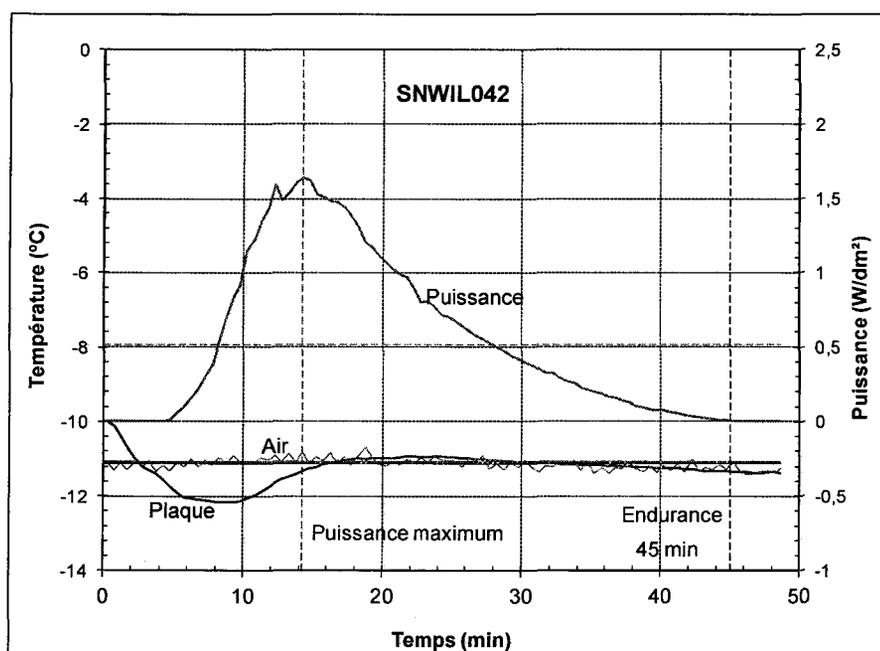


Figure 45 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 6 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL042

Comme on peut le voir à la **Figure 45**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de -11,1 °C avec de petites fluctuations régulières tout au long de l'essai et une incertitude de 0,4 °C. La température de la plaque débute à -10,0 °C et

décroît rapidement jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur minimale $-12,2\text{ °C}$, en raison de la température du fluide versé, qui est à la température de la chambre ($-11,1\text{ °C}$).

Cette diminution de température est compensée par une augmentation de puissance pour ramener la température de la plaque à $-12,1\text{ °C}$; la puissance atteint sa valeur maximale ($1,6\text{ W/dm}^2$). Durant les 20 premières minutes, le système est dans le régime transitoire, où la température de la plaque oscille autour d'une valeur moyenne de $-11,4\text{ °C}$, tandis que la puissance oscille autour de $0,8\text{ W/dm}^2$. Par la suite, la température de la plaque demeure presque constante à une valeur de $-11,1\text{ °C}$ durant 25 minutes, tandis que la valeur de la puissance diminue lentement autour d'une moyenne de $0,3\text{ W/dm}^2$ durant le même intervalle de temps. Lorsque le fluide atteint son temps d'endurance, qui est de 45 minutes, la puissance est nulle et la température de la plaque tend vers une valeur constante de $-11,3\text{ °C}$. L'écart de la température moyenne entre la plaque et l'air est de $0,2\text{ °C}$.

La courbe de la masse représente la masse de neige cumulative qui tombe sur le fluide tout au long de l'essai (**Figure 46**). Cette masse qui augmente linéairement avec le temps correspond à l'intensité des précipitations de neige qui est constante durant un essai.

La masse totale cumulée durant 45 minutes est de $283,7\text{ g}$ et correspond à une intensité moyenne de $25,1 \pm 3,1\text{ g/dm}^2/\text{h}$. Les petits pics observés sont les fluctuations du système de contrôle des précipitations pour maintenir une intensité constante (pour plus de détails, voir la section 3.2.1.1 pour une boîte à petits trous).

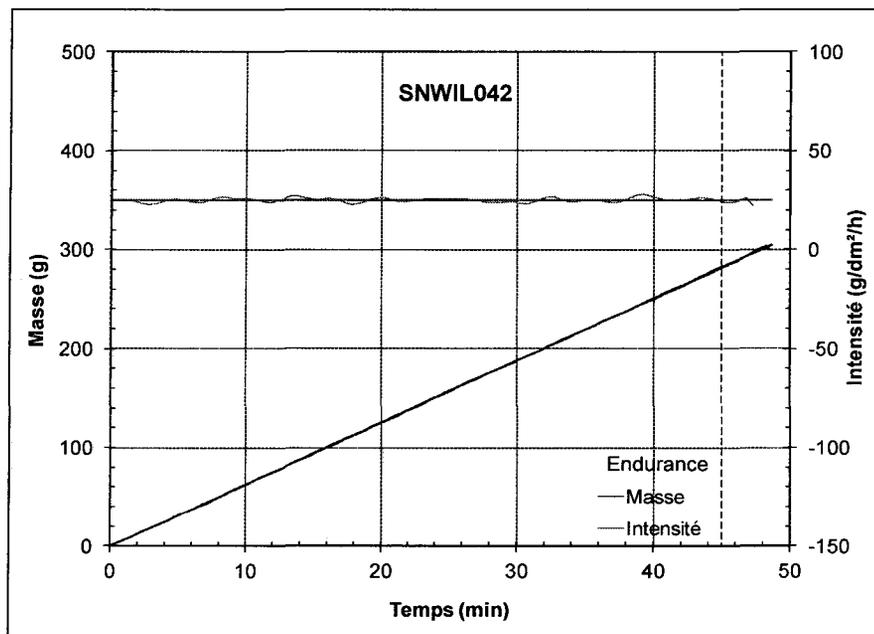


Figure 46 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 6 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL042

– Boîte à neige avec de gros trous

La Figure 47 et la Figure 48 correspondent à l'essai SNWIL061 effectué avec un cylindre à gros trous.

Comme le montre la Figure 47, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de $-10,9\text{ °C}$ avec de petites fluctuations régulières tout au long de l'essai et une incertitude de $0,2\text{ °C}$. La température de la plaque débute à $-9,5\text{ °C}$, décroît rapidement à une valeur minimale de $-11,2\text{ °C}$, après le versage du fluide, en raison de la température du fluide qui est à la température de la chambre ($-11,1\text{ °C}$).

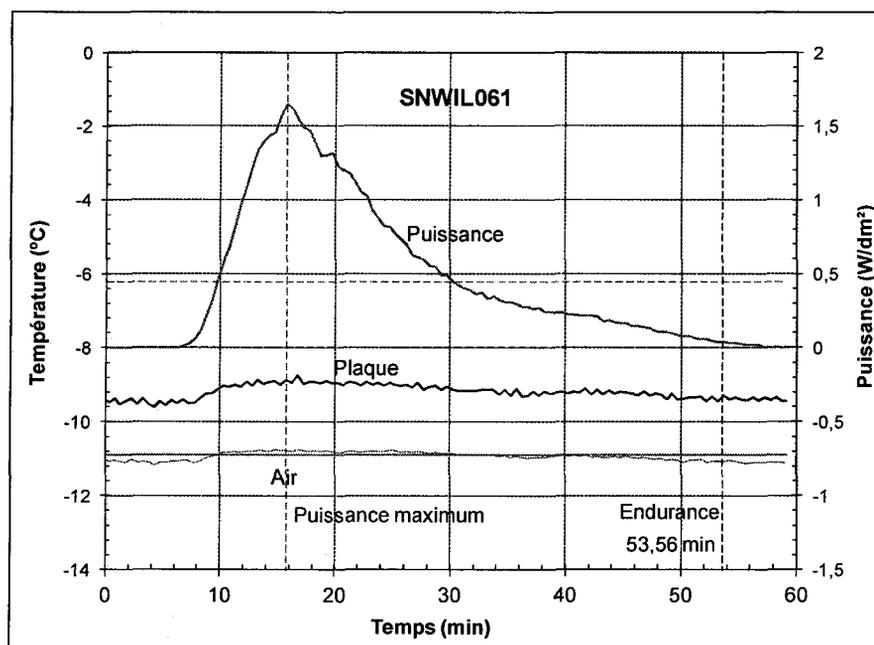


Figure 47 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 6 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL061

Cette diminution de température est compensée par une augmentation de puissance qui atteint sa valeur maximale ($1,65 \text{ W/dm}^2$). Durant les 20 premières minutes le système est dans le régime transitoire, où la température de la plaque oscille autour d'une valeur moyenne de $-9,2 \text{ °C}$, tandis que la puissance oscille autour de $0,7 \text{ W/dm}^2$, car le système de contrôle de la plaque tend à stabiliser la température de la plaque à $-12,1 \text{ °C}$. Lorsque la température de la plaque est stabilisée, elle oscille autour de $-9,2 \text{ °C}$ durant 33 minutes, tandis que la valeur de la puissance diminue lentement autour d'une moyenne de $0,3 \text{ W/dm}^2$ durant le même intervalle de temps. Lorsque le fluide atteint son temps d'endurance, qui est de 53,56 minutes, la puissance est nulle et la température de la plaque tend vers une valeur constante de $-9,4 \text{ °C}$. L'écart de la température moyenne entre la plaque et l'air est de $1,7 \text{ °C}$.

La courbe de la masse représente la masse de neige cumulative qui tombe sur le fluide tout au long de l'essai (**Figure 48**). Cette masse qui augmente linéairement avec le temps correspond à l'intensité des précipitations de neige qui est constante durant un essai.

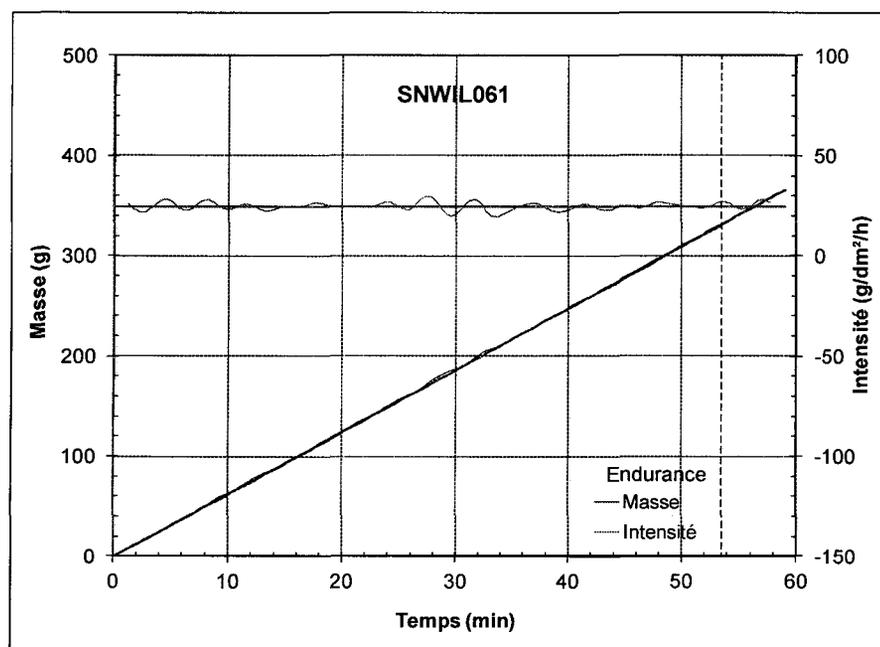


Figure 48 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 6 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL061

La masse totale cumulée durant 53,56 minutes est de 330,9 g et correspond à une intensité moyenne de $24,8 \pm 5,1$ g/dm²/h. Les petits pics observés sont les fluctuations du système de contrôle des précipitations pour maintenir une intensité constante (pour plus de détails, voir la section 3.2.1.1 pour une boîte à petits trous).

3.2.2.3 Température de l'air de -14 °C et de la plaque de -16,1 °C

La condition 7 est effectuée à une intensité de 25 g/dm²/h à une température de l'air de -14 °C et une température de plaque de -16,1 °C, avec un cylindre à petits et gros trous pour la boîte à neige.

– Boîte à neige avec de petits trous

La **Figure 49** et la **Figure 50** correspondent à l'essai SNWIL065 effectué avec un cylindre à petits trous.

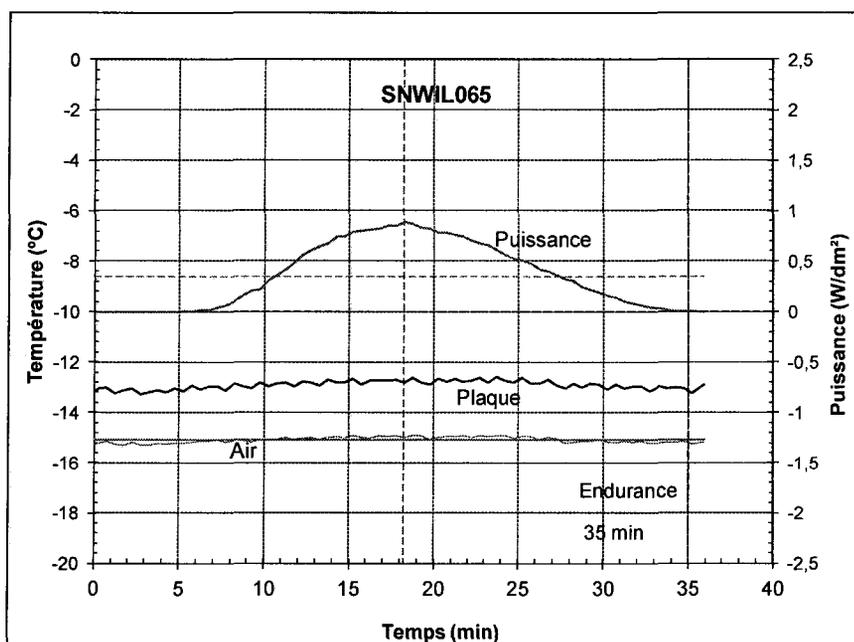


Figure 49 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 7 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL065

Comme on peut le voir à la **Figure 49**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de -15,1 °C avec de petites fluctuations régulières tout au long de l'essai et une incertitude de 0,2 °C. La température de la plaque débute à -13,0 °C, la

température moyenne de la plaque tout au long de l'essai est de $-12,9\text{ °C}$ et est presque constante durant l'essai. À partir de la septième minute, la puissance fournie au fluide augmente jusqu'à ce qu'il atteigne sa valeur maximale de $0,9\text{ W/dm}^2$. L'écart de la température moyenne entre la plaque et l'air est de $2,2\text{ °C}$.

La courbe de la masse représente la masse de neige cumulative qui tombe sur le fluide tout au long de l'essai (**Figure 50**). Cette masse qui augmente linéairement avec le temps correspond à l'intensité des précipitations de neige qui est constante durant un essai.

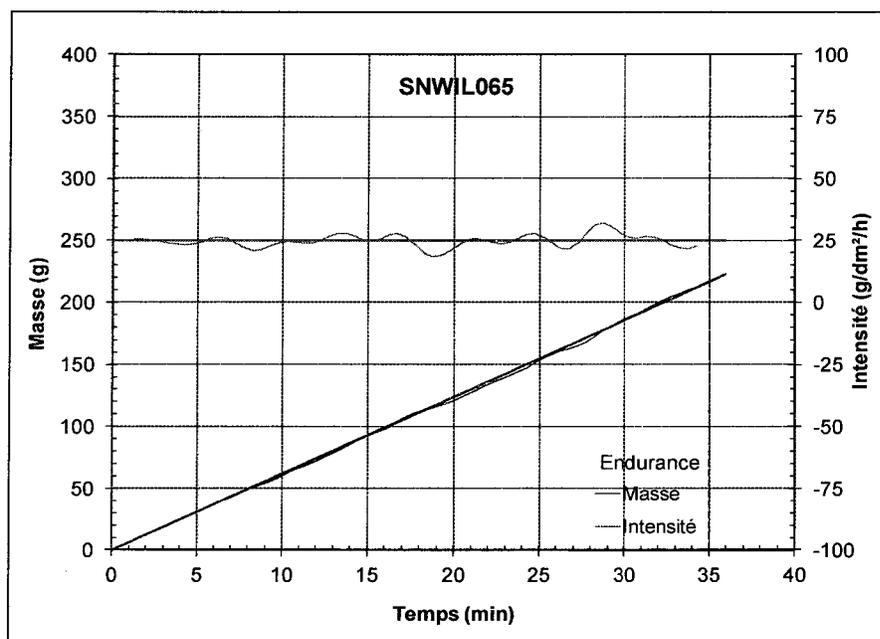


Figure 50 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 7 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL065

La masse totale cumulée durant 35 minutes est de $216,8\text{ g}$ et correspond à une intensité moyenne de $24,8 \pm 6,9\text{ g/dm}^2/\text{h}$. Les petits pics observés sont les fluctuations du système de

contrôle des précipitations pour maintenir une intensité constante (pour plus de détails, voir la section 3.2.1.1 pour une boîte à petits trous).

– **Boîte à neige avec de gros trous**

La **Figure 51** et la **Figure 52** correspondent à l'essai SNWIL064 effectué avec un cylindre à petits trous.

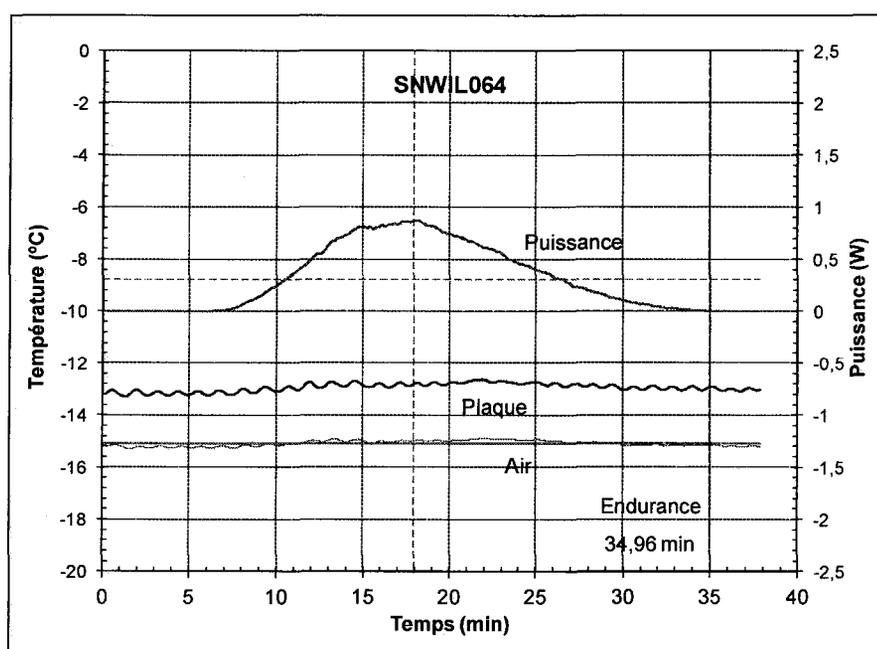


Figure 51 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 7 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL064

Comme le montre la **Figure 51**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de $-15,1\text{ °C}$ avec de petites fluctuations régulières tout au long de l'essai et une incertitude de $0,2\text{ °C}$. La température de la plaque débute à $-13,2\text{ °C}$, la température moyenne de la plaque tout au long de l'essai est de $-12,9\text{ °C}$ et est presque constante durant l'essai. À partir de la huitième minute, la puissance fournie au fluide

augmente jusqu'à ce qu'il atteigne sa valeur maximale de $0,9 \text{ W/dm}^2$. L'écart de la température moyenne entre la plaque et l'air est de $2,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

La courbe de la masse représente la masse de neige cumulative qui tombe sur le fluide tout au long de l'essai (**Figure 52**). Cette masse qui augmente linéairement avec le temps correspond à l'intensité des précipitations de neige qui est constante durant un essai.

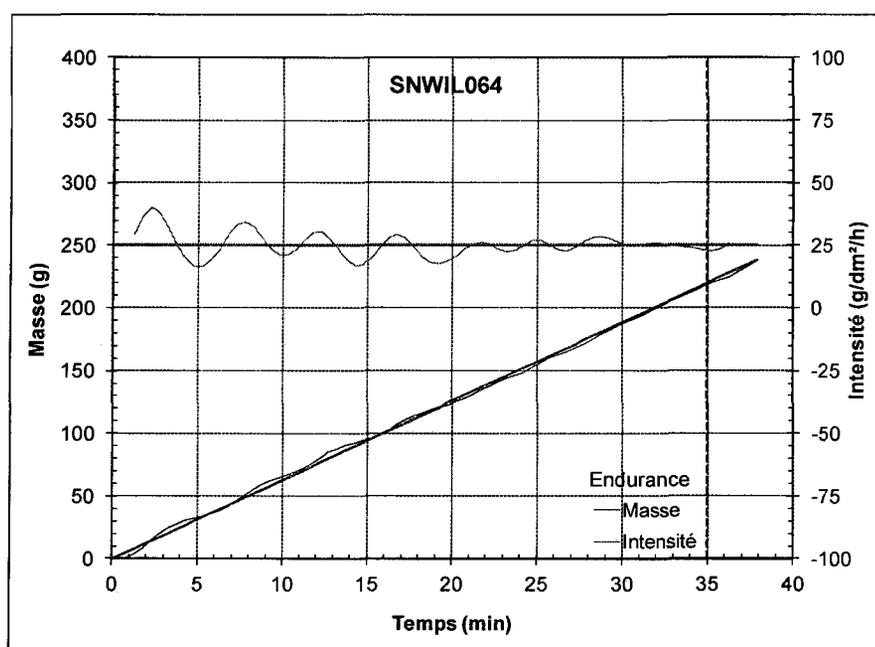


Figure 52 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 7 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL064

La masse totale cumulée durant 34,96 minutes est de 218,3 g et correspond à une intensité moyenne de $25,3 \pm 11,8 \text{ g/dm}^2/\text{h}$. Les petits pics observés sont les fluctuations du système de contrôle des précipitations pour maintenir une intensité constante (pour plus de détails, voir la section 3.2.1.1 pour une boîte à petits trous).

3.2.2.4 Température de l'air de -25 °C et de la plaque de $-27,1\text{ °C}$

La condition 8 est effectuée à une intensité de $25\text{ g/dm}^2/\text{h}$ à une température de l'air de -25 °C et une température de plaque de $-27,1\text{ °C}$, avec un cylindre à petits et gros trous pour la boîte à neige.

– Boîte à neige avec de petits trous

La **Figure 53** et la **Figure 54** correspondent à l'essai SNWIL056 effectué avec un cylindre à petits trous.

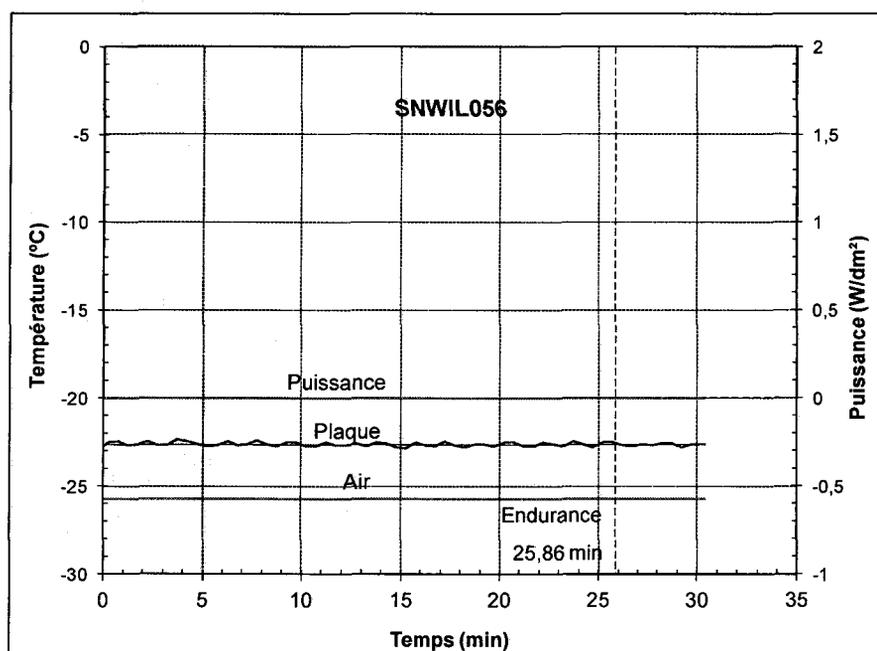


Figure 53 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 8 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL056

Comme on peut le voir à la **Figure 53**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de $-25,7\text{ °C}$ avec de légères fluctuations tout au long de l'essai et une incertitude de $0,04\text{ °C}$. La température de la plaque débute à $-22,5\text{ °C}$ et reste

constante avec une valeur moyenne de $-22,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. La puissance fournie à la plaque est nulle tout au long de l'essai.

La courbe de la masse représente la masse de neige cumulative qui tombe sur le fluide tout au long de l'essai (**Figure 54**). Cette masse qui augmente linéairement avec le temps correspond à l'intensité des précipitations de neige qui est constante durant un essai.

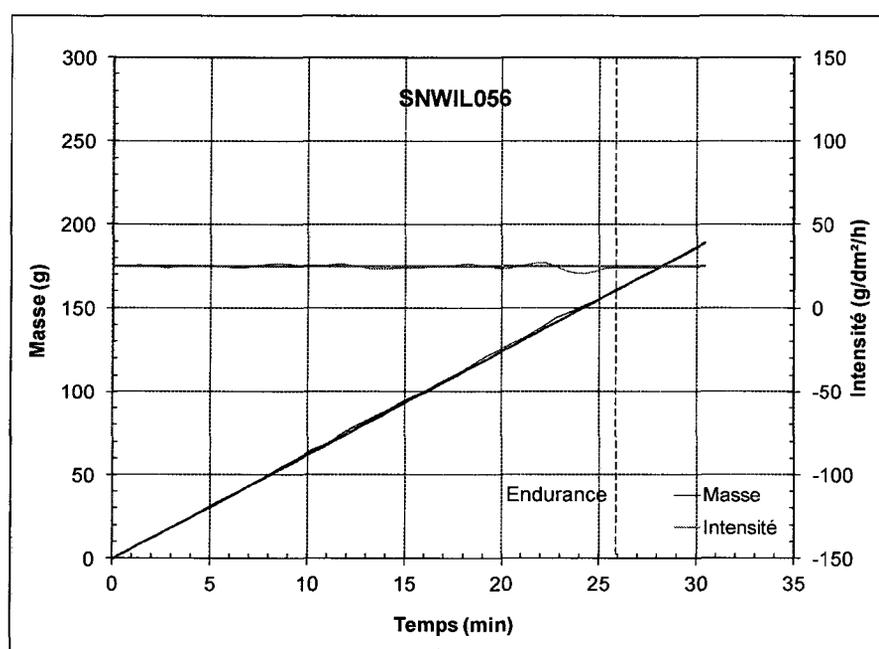


Figure 54 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 8 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL056

La masse totale cumulée durant 25,86 minutes est de 160,8 g et correspond à une intensité moyenne de $24,8 \pm 3,1\text{ g/dm}^2/\text{h}$. Les petits pics observés sont les fluctuations du système de contrôle des précipitations pour maintenir une intensité constante (pour plus de détails, voir la section 3.2.1.1 pour une boîte à petits trous).

– Boîte à neige avec de gros trous

La **Figure 55** et la **Figure 56** correspondent à l'essai SNWIL057 effectué avec un cylindre à gros trous.

Comme on peut le voir à la **Figure 55**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de $-25,7\text{ °C}$ avec de légères fluctuations tout au long de l'essai et une incertitude de $0,05\text{ °C}$. La température de la plaque débute à $-22,3\text{ °C}$ et reste constante avec une valeur moyenne de $-22,5\text{ °C}$. La puissance fournie à la plaque est nulle tout au long de l'essai.

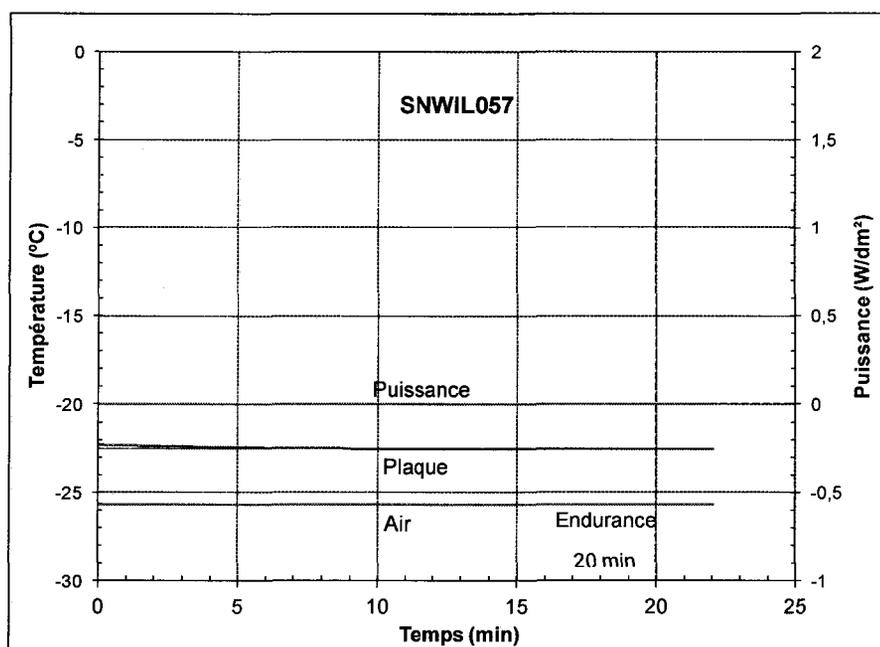


Figure 55 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 8 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL057

La courbe de la masse représente la masse de neige cumulative qui tombe sur le fluide tout au long de l'essai (Figure 56). Cette masse qui augmente linéairement avec le temps correspond à l'intensité des précipitations de neige qui est constante durant un essai.

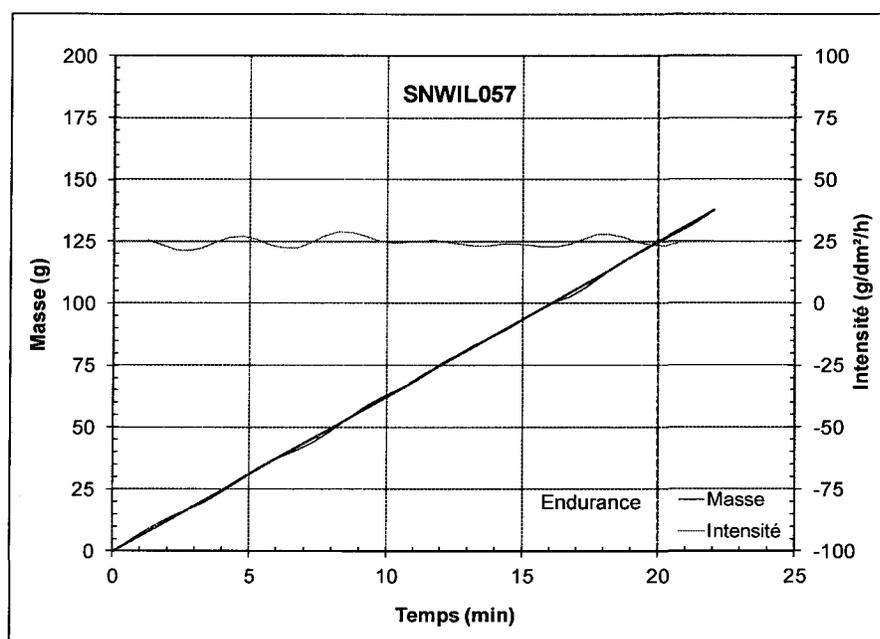


Figure 56 : Évolution de la masse et de l'intensité au cours d'un essai de la condition 8 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL057

La masse totale cumulée durant 20 minutes est de 124,7 g et correspond à une intensité de $24,7 \pm 4,0$ g/dm²/h. Les petits pics observés sont les fluctuations du système de contrôle des précipitations pour maintenir une intensité constante (pour plus de détails, voir la section 3.2.1.1 pour une boîte à petits trous).

3.3 Essais complémentaires

Les essais complémentaires, réalisés pour deux valeurs de température et deux intensités de précipitations afin de mesurer la température du fluide et calculer la concentration en

propylène glycol, sont présentés dans cette section; ils sont effectués avec un cylindre à petits trous.

3.3.1 Intensité de 10 g/dm²/h

Les résultats des essais, qui reproduisent ceux des sections 3.2.1.3 et 3.2.1.4 pour l'intensité de 10 g/dm²/h à des températures de -14 °C et -25 °C correspondant aux conditions 3 et 4, sont présentés dans les prochaines sections.

3.3.1.1 Température de l'air de -14 °C et de la plaque de -15,2 °C

Les résultats présentés dans cette section correspondent aux essais réalisés avec la condition 3 où la température de la plaque est de -15,2 °C. Pour cette condition, quatre essais ont été réalisés. Pour les quatre essais, la température de fluide est mesurée au moyen d'un thermocouple, et pour les deux derniers essais un réfractomètre est utilisé pour mesurer la concentration en propylène glycol et la comparer à celle calculée théoriquement. Un seul essai pour chaque type est présenté dans cette section et les autres sont présentés à l'Annexe B.

– Essai SNWIL090

La **Figure 57** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque, du fluide, de la température de solidification calculée à partir de la concentration en propylène glycol du fluide et de la puissance fournie lors de l'essai SNWIL090. La **Figure 58** présente l'évolution de la masse et de l'intensité en fonction du temps.

Comme le montre la **Figure 57**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de $-13,8\text{ °C}$. La température de l'air fluctue légèrement tout au long de l'essai et l'incertitude est de $0,5\text{ °C}$. La température de la plaque débute à $-14,5\text{ °C}$, décroît rapidement à une valeur minimale de $-15,5\text{ °C}$, pour remonter légèrement et se stabiliser à une valeur moyenne de $-15,0\text{ °C}$. La température du fluide, qui possède un comportement similaire à celle de la plaque, débute à $-14,4\text{ °C}$, décroît rapidement à une valeur minimale de $-15,3\text{ °C}$, pour remonter légèrement et se stabiliser à une valeur moyenne de $-14,8\text{ °C}$. La diminution de température de la plaque est compensée par une augmentation de puissance pour ramener la température de la plaque à la température cible de $-15,2\text{ °C}$.

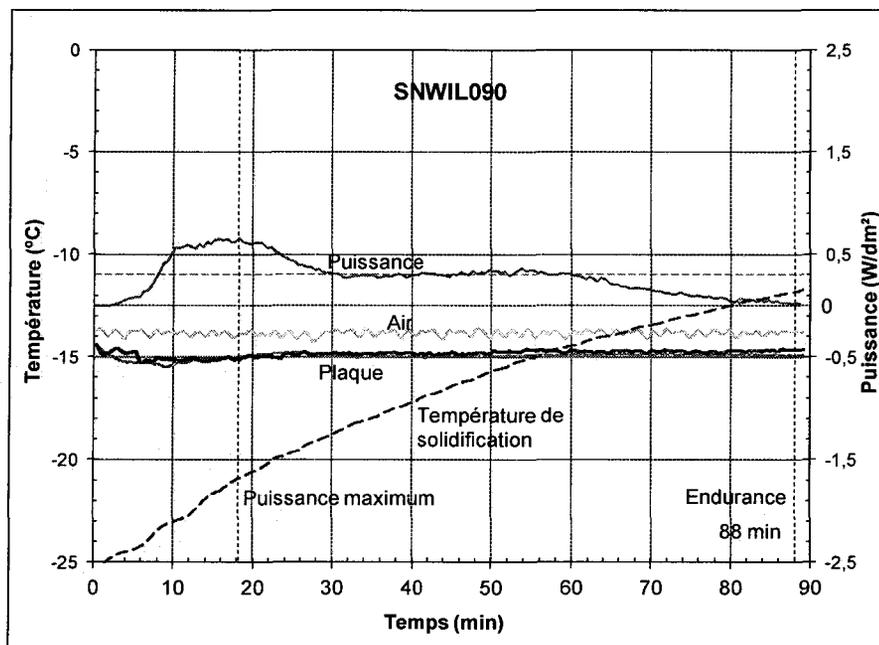


Figure 57 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL090

La puissance atteint sa valeur maximale de $0,7\text{ W/dm}^2$ après 18 minutes. Durant les 30 premières minutes le système est dans le régime transitoire, où la température de la plaque

oscille autour d'une valeur moyenne de $-15,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, tandis que la puissance oscille autour de $0,4\text{ W/dm}^2$, car le système de contrôle essaie de stabiliser la température de la plaque à la température cible de $-15,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lorsque la température de la plaque est stabilisée, elle oscille autour de $-14,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ durant 58 minutes, tandis que la valeur de la puissance demeure constante durant 30 minutes à une valeur de $0,3\text{ W/dm}^2$ pour diminuer lentement à une valeur de $0,1\text{ W/dm}^2$ durant les 28 dernières minutes. Lorsque le fluide atteint son temps d'endurance, qui est de 88 minutes, la puissance est pratiquement nulle et la température de la plaque tend vers une valeur constante de $-14,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ et celle du fluide à une valeur de $-14,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'écart de la température moyenne entre la plaque et l'air est de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, et celle entre le fluide et la plaque de $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

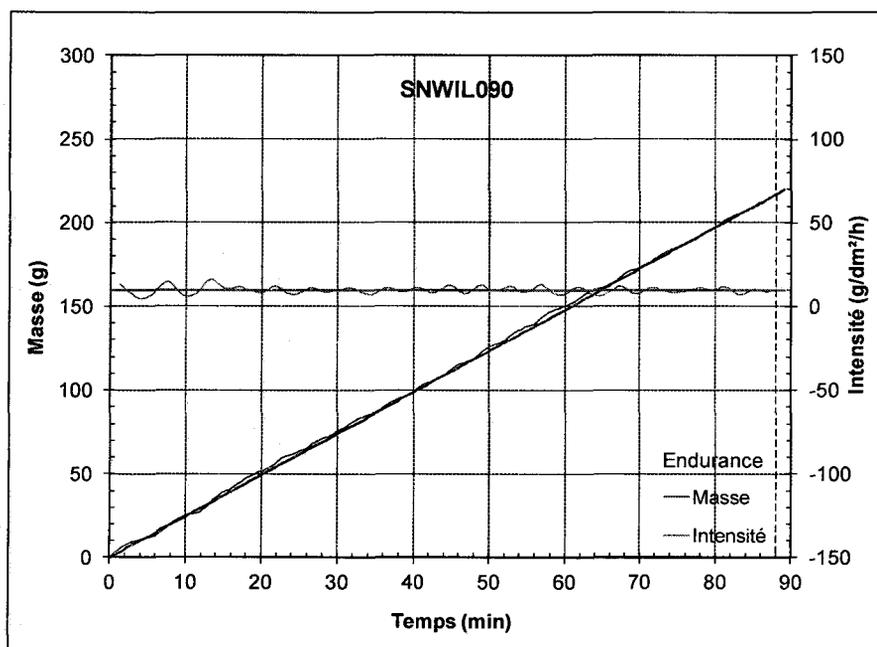


Figure 58 : Évolution de l'intensité des précipitations et de la masse de neige dans le temps pour l'essai SNWIL090

Sous l'intensité moyenne de précipitations de neige qui est de $9,9 \pm 5,9$ g/dm²/h, la masse du fluide augmente, comme on peut le voir à la **Figure 58**. La neige accumulée durant l'essai (88 minutes) de masse de 219,8 g, est absorbée par le fluide; celle-ci fond et se diffuse dans le fluide amenant la diminution de la concentration en propylène glycol qui est provoquée par la dilution du fluide. Cela augmente graduellement le point de solidification de fluide au cours d'un essai, qui débute à une valeur de $-25,7$ °C pour se terminer à une valeur de $-11,8$ °C, comme le montre la **Figure 57**.

La concentration du fluide débute à 44 %, diminue graduellement pour atteindre une concentration de 32,4 % à la 57^e minute, correspondant au croisement de la température du fluide mesurée ($-14,8$ °C) et de la température de solidification calculée à partir de la concentration. La concentration de fluide en propylène glycol à l'échec est de 28,6 %.

Le croisement des températures du fluide et de solidification qui se produit à la 57^e minute correspond au temps où la puissance fournie commence à diminuer.

La **Figure 59** regroupe les différentes photos prises durant l'essai qui montrent le processus d'absorption de la neige par le fluide. Sur chaque photo, le temps en minutes durant lequel la photo est prise est marqué en blanc.

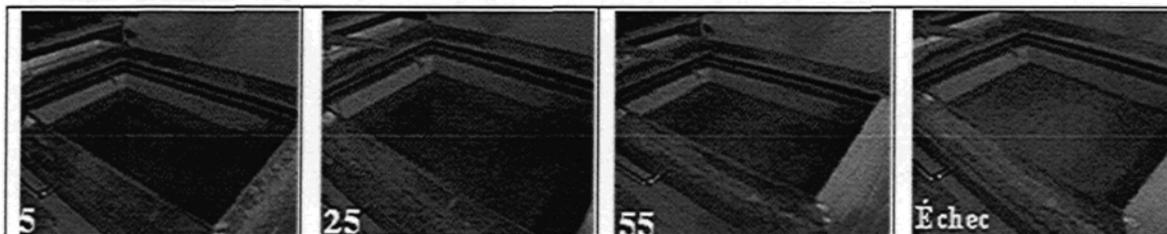


Figure 59 : Photos de l'évolution de l'absorption de neige par le fluide prises durant l'essai

– Essai SNWIL102

La **Figure 60** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque, du fluide, de la température de solidification calculée à partir de la concentration en propylène glycol du fluide et celle calculée à partir de la concentration obtenue avec le réfractomètre et la puissance fournie pour l'essai SNWIL102. La **Figure 61** présente l'évolution de la masse et de l'intensité en fonction du temps.

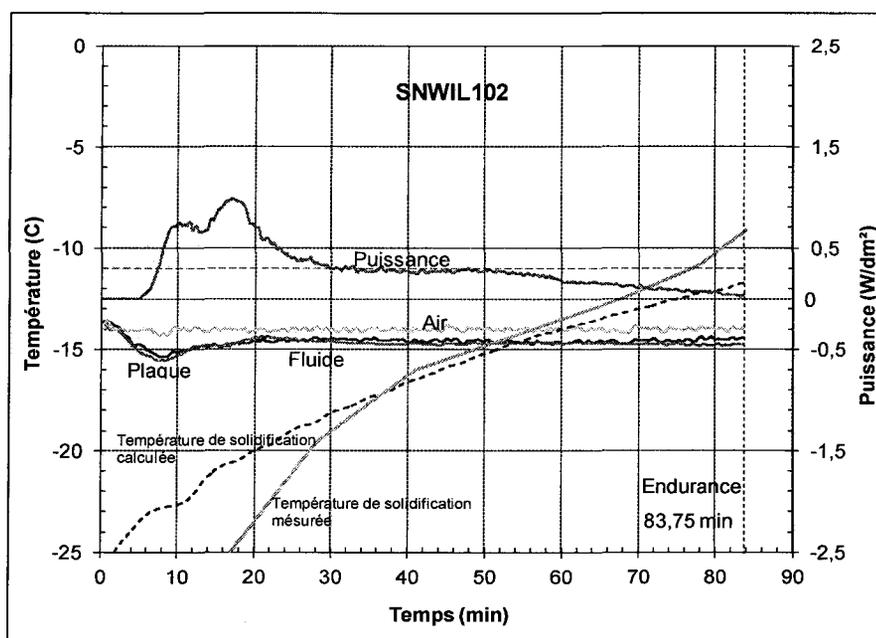


Figure 60 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL102

Comme le montre la **Figure 60**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de $-14,0\text{ °C}$. La température de l'air fluctue légèrement tout au long de l'essai et l'incertitude est de $0,4\text{ °C}$. La température de la plaque débute à $-13,7\text{ °C}$, décroît rapidement à une valeur minimale de $-15,6\text{ °C}$, pour remonter légèrement et se stabiliser à une valeur moyenne de $-14,8\text{ °C}$. La température du fluide qui possède un comportement

similaire à celle de la plaque débute à $-13,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, décroît rapidement à une valeur minimale de $-15,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour remonter légèrement et se stabiliser à une valeur moyenne de $-14,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. La diminution de température de la plaque est compensée par une augmentation de puissance pour ramener la température de la plaque à la température cible de $-15,2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La puissance augmente une première fois à une valeur de $0,8\text{ W/dm}^2$ après 11 minutes et augmente une seconde fois à une valeur de $1,0\text{ W/dm}^2$ après 18 minutes.

Durant les 30 premières minutes le système est dans le régime transitoire, où la température de la plaque oscille autour d'une valeur moyenne de $-14,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, tandis que la puissance oscille autour de $0,5\text{ W/dm}^2$, car le système de contrôle essaie de stabiliser la température de la plaque à la température cible de $-15,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lorsque la température de la plaque est stabilisée, elle oscille autour de $-14,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ durant 30 minutes, tandis que la valeur de la puissance demeure constante durant 30 minutes à une valeur de $0,3\text{ W/dm}^2$ pour diminuer lentement à une valeur de $0,1\text{ W/dm}^2$ durant les 23 dernières minutes. Lorsque le fluide atteint son temps d'endurance, qui est de 83,75 minutes, la puissance est pratiquement nulle et la température de la plaque tend vers une valeur constante de $-14,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ et celle du fluide à une valeur de $-14,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'écart de la température moyenne entre la plaque et l'air est de $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ et celle entre le fluide et la plaque de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Sous l'intensité moyenne de précipitations de neige qui est de $10,6 \pm 14,9\text{ g/dm}^2/\text{h}$, la masse du fluide augmente comme on peut le voir à la **Figure 61**. La neige accumulée durant l'essai (83,75 minutes) de masse de 220,7 g, est absorbée par le fluide; celle-ci fond et se diffuse dans le fluide amenant la diminution de la concentration en propylène glycol qui est

provoquée par la dilution du fluide. Cela augmente graduellement le point de solidification de fluide au cours d'un essai, qui débute à une valeur de $-25,7\text{ °C}$ pour se terminer à une valeur de $-11,7\text{ °C}$ comme le montre la **Figure 60**. La concentration du fluide débute à 44 %, diminue graduellement pour atteindre une concentration de 32,3 % à la 54^e minute correspondant au croisement de la température du fluide mesurée ($-14,7\text{ °C}$) et de la température de solidification calculée à partir de la concentration. La concentration de fluide en propylène glycol à l'échec est de 28,4 %.

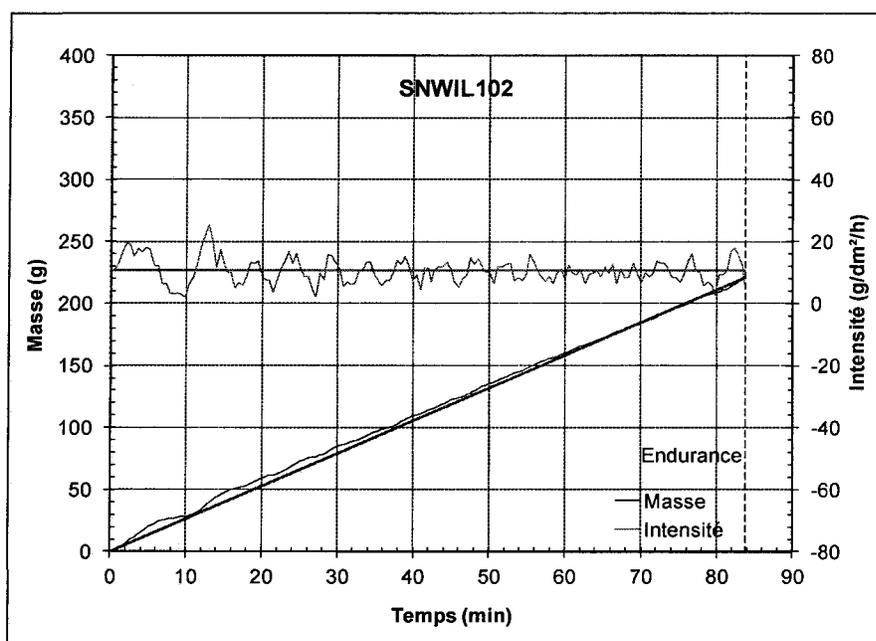


Figure 61 : Évolution de l'intensité des précipitations et de la masse de neige dans le temps pour l'essai SNWIL102

Le croisement des températures du fluide et de solidification qui se produit à la 54^e minute correspond au temps où la puissance fournie commence à diminuer.

Le **Tableau 4** présente les concentrations mesurées expérimentalement durant les essais ainsi que celles calculées et la température de solidification du fluide correspondante.

Tableau 4 : Concentration et température de solidification expérimentale et calculée de propylène glycol durant l'essai

Minute	Concentration			Température de solidification		
	Expérimentale	Calculée	Erreur relative	Expérimentale	Calculée	Erreur relative
14	44,7	39,7	12 %	-26,4	-21,3	21 %
28	37,9	36,8	3 %	-19,6	-18,6	5 %
41	33,9	34,4	2 %	-16,0	-16,5	3 %
68	29,4	30,4	3 %	-12,5	-13,2	6 %
78	27,1	29,1	7 %	-10,8	-12,2	12 %
83	24,6	28,5	15 %	-9,1	-11,7	25 %

L'erreur relative entre les concentrations en propylène glycol expérimentales et calculées, qui est de l'ordre de 12 %, diminue avec le temps et augmente à l'échec (15 %). Cette différence est due à l'imprécision des appareils de mesure. C'est un comportement similaire pour la température de solidification, alors que l'erreur relative pour les premières minutes est égale à 21 % et diminue au cours de l'essai pour terminer à une valeur de 25 %.

La **Figure 62** regroupe les différentes photos prises durant l'essai qui montrent le processus d'absorption de la neige par le fluide. Sur chaque photo, le temps en minutes durant lequel la photo est prise est marqué en blanc.

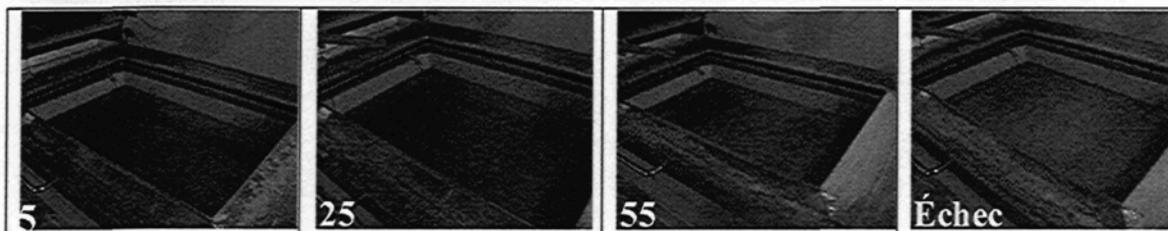


Figure 62 : Photos de l'évolution de l'absorption de neige par le fluide prises durant l'essai

3.3.1.2 Température de l'air de -25 °C et de la plaque de -26,2 °C

Les résultats présentés dans cette section correspondent aux essais réalisés avec la condition 4 où la température de la plaque est de -26,2 °C. Pour cette condition deux essais ont été

réalisés. Pour les deux essais, la température de fluide est calculée ainsi que la concentration en propylène glycol qui est calculée théoriquement et mesurée expérimentalement à l'aide d'un réfractomètre.

– **Essai SNWIL109**

La **Figure 63** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque, du fluide, de la température de solidification calculée à partir de la concentration en glycol du fluide et celle calculée à partir de la concentration obtenue avec le réfractomètre et de la puissance fournie lors de l'essai SNWIL109. La **Figure 64** présente l'évolution de la masse et de l'intensité en fonction du temps.

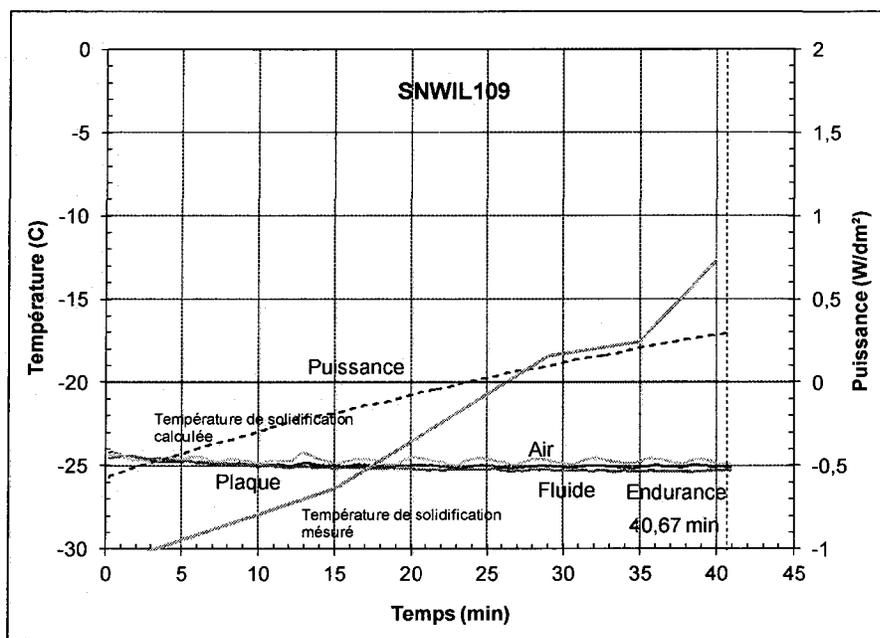


Figure 63 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL109

Comme le montre la **Figure 63**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de $-24,7\text{ °C}$ avec des variations de $0,4\text{ °C}$ tout au long de l'essai dues au contrôle de la chambre climatique. La température de la plaque débute à $-24,5\text{ °C}$ et reste constante avec une valeur moyenne de $-25,1\text{ °C}$. Aucune puissance n'est fournie à la plaque tout au long de l'essai pour maintenir sa température.

La température du fluide possède un comportement similaire à celui de la température de la plaque avec une température moyenne de $-25,0\text{ °C}$ durant 38 minutes. Le point de solidification du fluide augmente avec les précipitations de neige en raison de la diminution de la concentration de propylène glycol dans le fluide au cours d'un essai. La concentration en propylène glycol passe de 44 %, à 35,1 %, ce qui entraîne une augmentation du point de solidification de $-25,7\text{ °C}$ à $-17,03\text{ °C}$.

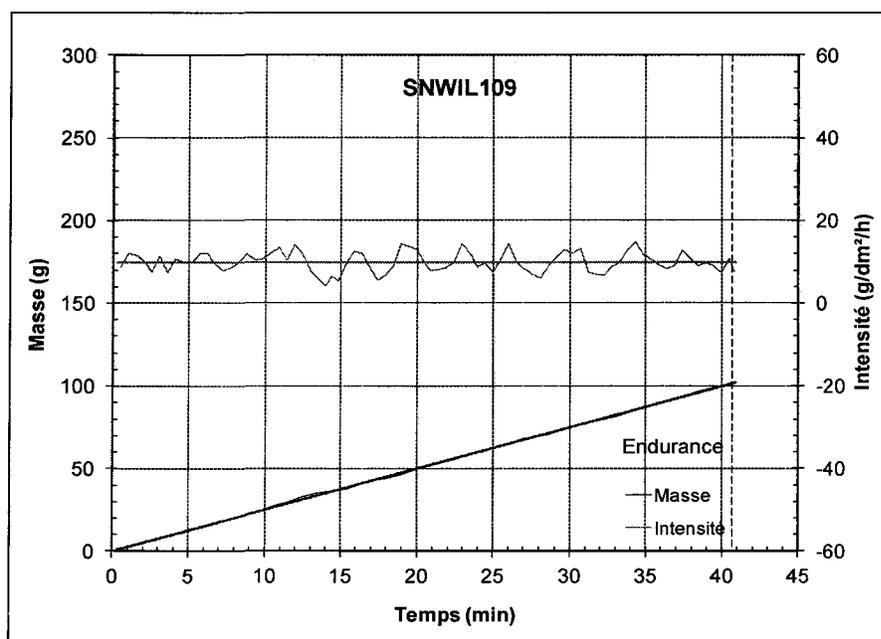


Figure 64 : Évolution de l'intensité des précipitations et de la masse de neige dans le temps pour l'essai SNWIL109

Sous l'intensité moyenne de précipitations de neige qui est de $10,0 \pm 17,2$ g/dm²/h, la masse cumulée de neige augmente linéairement pour atteindre 101,8 g après 40,67 minutes (**Figure 64**).

La neige qui s'accumule dans le fluide fond, se diffuse, diluant le propylène glycol, ce qui augmente son point de solidification. Lorsque la concentration atteint 43,4 %, ce qui se produit à la minute 2,25, le point de solidification qui est de -25 °C croise la température de fluide. Lorsque la température du fluide est égale ou inférieure au point de solidification, le fluide débute sa solidification en libérant lentement sa chaleur latente de fusion. Cette chaleur est suffisante pour maintenir la température de la plaque à la valeur cible, ce qui explique que la température de la plaque est maintenue sans apport de puissance, en dépit du fait que de l'énergie est requise pour faire fondre la neige. Pour les deux premières minutes, l'apport de chaleur émane de la masse thermique du fluide qui fournit la chaleur requise par une baisse de sa température. Lorsque le temps atteint 35 minutes, la neige ne fond plus ou fond partiellement et commence à s'accumuler à la surface du fluide. Lorsque 5 dm² sont recouverts, le fluide est en mode échec, ce qui se produit à la 40^e minute. Le fluide a terminé de libérer sa chaleur latente de fusion lorsque la neige blanche commence à s'accumuler sur la surface du fluide, qui a une forme pâteuse due au mélange de la neige et le fluide.

Le **Tableau 5** présente les concentrations mesurées expérimentalement durant l'essai, ainsi que celles calculées, et la température de solidification du fluide correspondante.

Tableau 5 : Concentration et température de solidification expérimentale et calculée de propylène glycol durant l'essai

Minute	Concentration			Température de solidification		
	Expérimentale	Calculée	Erreur relative	Expérimentale	Calculée	Erreur relative
15	44,6	40,3	10 %	-26,3	-21,9	18 %
29	36,6	37,3	2 %	-18,4	-19,0	3 %
35	35,6	36,1	1 %	-17,5	-18,0	3 %
40	29,7	35,2	17 %	-12,7	-17,1	29 %

L'erreur relative entre les concentrations en propylène glycol expérimentales et calculées, qui est de l'ordre de 10 %, diminue avec le temps et augmente à l'échec (17 %). Cette différence est due à l'imprécision des appareils de mesure. C'est un comportement similaire pour la température de solidification, alors que l'erreur relative pour les premières minutes est égale à 18 % et diminue au cours de l'essai pour terminer à une valeur de 29 %.

– Essai SNWIL106

La **Figure 65** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque, du fluide, de la température de solidification calculée à partir de la concentration en glycol du fluide et celle calculée à partir de la concentration obtenue avec le réfractomètre et de la puissance fournie lors de l'essai SNWIL106. La **Figure 66** présente l'évolution de la masse et de l'intensité en fonction du temps.

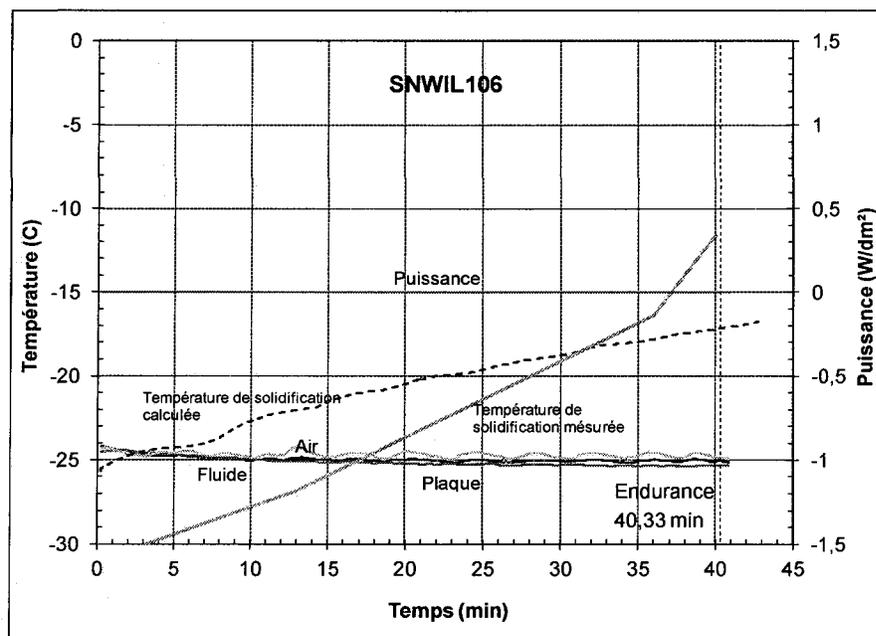


Figure 65 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL106

Comme on peut le voir à la **Figure 65**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de $-24,7\text{ °C}$, avec des variations de $0,4\text{ °C}$ tout au long de l'essai dues au contrôle de la chambre climatique. La température de la plaque débute à $-24,5\text{ °C}$, et demeure constante avec une valeur moyenne de $-25,1\text{ °C}$. Aucune puissance n'est fournie à la plaque tout au long de l'essai pour maintenir sa température.

La température du fluide possède un comportement similaire à celui de la température de la plaque avec une température moyenne de $-25,0\text{ °C}$. Le point de solidification du fluide augmente avec les précipitations de neige en raison de la diminution de la concentration de propylène glycol dans le fluide au cours d'un essai. La concentration en propylène glycol passe de 44% , à $34,9\%$, ce qui entraîne une augmentation du point de solidification de $-25,7\text{ °C}$ à $-16,8\text{ °C}$.

Sous l'intensité moyenne de précipitations de neige qui est de $9,9 \pm 13,8$ g/dm²/h, la masse cumulée de neige augmente linéairement pour atteindre 106,2 g après 40,33 minutes (**Figure 66**).

La neige qui s'accumule dans le fluide fond, se diffuse, diluant le propylène glycol, ce qui augmente son point de solidification. Lorsque la concentration atteint 43,4 %, ce qui se produit à la minute 1,3, le point de solidification qui est de -25 °C croise la température du fluide. Lorsque la température du fluide est égale ou inférieure au point de solidification, le fluide débute sa solidification en libérant lentement sa chaleur latente de fusion. Cette chaleur est suffisante pour maintenir la température de la plaque à la valeur cible ce qui explique que la température de la plaque est maintenue sans apport de puissance, en dépit du fait que de l'énergie est requise pour faire fondre la neige. Pour les deux premières minutes, l'apport de chaleur émane de la masse thermique du fluide qui fournit la chaleur requise par une baisse de sa température. Lorsque le temps atteint 36 minutes, la neige ne fond plus ou fond partiellement et commence à s'accumuler à la surface du fluide. Lorsque 5 dm² sont recouverts, le fluide est en mode échec ce qui se produit à la 40^e minute. Le fluide a terminé de libérer sa chaleur latente de fusion lorsque la neige blanche commence à s'accumuler sur la surface du fluide, qui a une forme pâteuse due au mélange de la neige et le fluide.

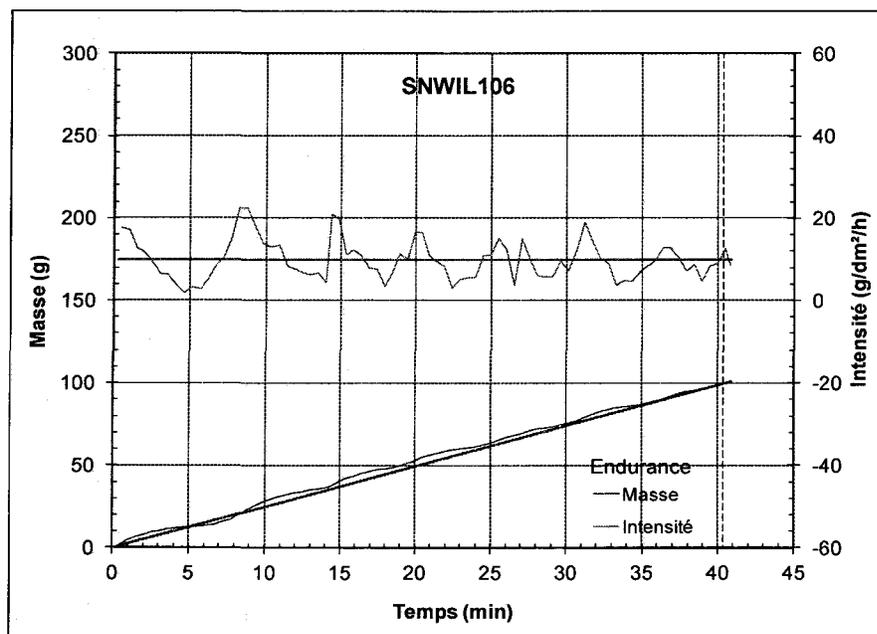


Figure 66 : Évolution de l'intensité des précipitations et de la masse de neige dans le temps pour l'essai SNWIL106

Le **Tableau 6** présente les concentrations mesurées expérimentalement durant les essais ainsi que celles calculées, et la température de solidification du fluide correspondante.

Tableau 6 : Concentration et température de solidification expérimentale et calculée de propylène glycol durant l'essai

Minute	Concentration			Température de solidification		
	Expérimentale	Calculée	Erreur relative	Expérimentale	Calculée	Erreur relative
13	45,1	40,4	11 %	-26,8	-22,0	20 %
26	39,3	37,7	4 %	-20,9	-19,4	7 %
36	34,3	36,0	5 %	-16,4	-17,8	8 %
40	28,2	35,3	22 %	-11,5	-17,2	40 %

L'erreur relative entre les concentrations en propylène glycol expérimentales et calculées, qui est de l'ordre de 11 %, diminue avec le temps et augmente à l'échec (22 %). Cette différence est due à l'imprécision des appareils de mesure. C'est un comportement similaire

pour la température de solidification, alors que l'erreur relative pour les premières minutes est égale à 20 % et diminue au cours de l'essai pour terminer à une valeur de 40 %.

3.3.2 Intensité de 25 g/dm²/h

Les résultats des essais complémentaires, qui reproduisent ceux des sections 3.2.2.3 et 3.2.2.4 pour l'intensité de 25 g/dm²/h à des températures de -14 °C et -25 °C correspondant aux conditions 7 et 8, sont présentés dans les prochaines sections.

3.3.2.1 Température de l'air de -14 °C et de la plaque de -16,1 °C

Les résultats présentés dans cette section correspondent aux essais réalisés avec la condition 7 où la température de la plaque est de -16,1 °C. Pour cette condition, quatre essais ont été réalisés. Pour les quatre essais, la température du fluide est calculée, et pour les deux derniers essais, un réfractomètre est utilisé pour mesurer la concentration en propylène glycol et la comparer avec celle calculée théoriquement. Un seul essai pour chaque type est présenté dans cette section; les autres sont présentés à l'Annexe B.

– Essai SNWIL095

La **Figure 67** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque, du fluide, de la température de solidification calculée à partir de la concentration en propylène du fluide et de la puissance fournie lors de l'essai SNWIL095. La **Figure 68** présente l'évolution de la masse et de l'intensité en fonction du temps.

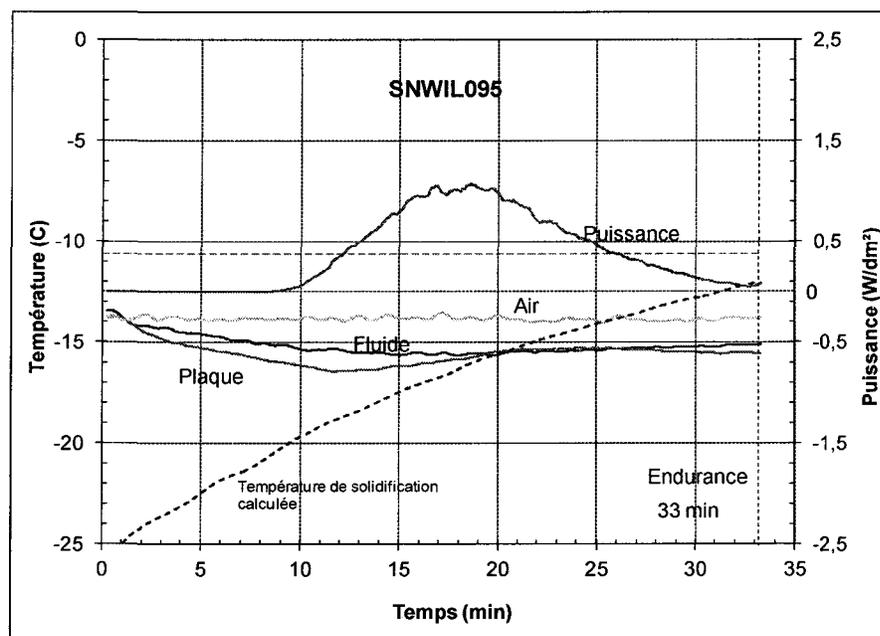


Figure 67 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL095

Comme le montre la **Figure 67**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de $-13,8\text{ °C}$ avec de légères fluctuations tout au long de l'essai de variation de $0,2\text{ °C}$. La température de la plaque débute à $-13,8\text{ °C}$, décroît rapidement à une valeur minimale de $-16,5\text{ °C}$, pour remonter légèrement et se stabiliser à une valeur moyenne de $-15,6\text{ °C}$. La température du fluide qui possède un comportement similaire à celle de la plaque, mais qui décroît plus lentement, débute à la température de $-13,4\text{ °C}$, décroît à une valeur minimale de $-15,7\text{ °C}$ pour remonter légèrement et se stabiliser à une valeur moyenne de $-15,2\text{ °C}$. La seule différence majeure entre le comportement de la température du fluide et celle de la plaque est que durant la transition la température du fluide diminue plus lentement que celle de la plaque. La diminution de température de la plaque est compensée par une augmentation de puissance pour ramener la température de la

plaque à la température cible de $-16,1\text{ °C}$. Lorsque la température de la plaque devient plus basse que la température cible, de la puissance est fournie à la plaque pour maintenir sa température à la température cible.

La puissance débute à zéro, à la 9^e minute, de la puissance est fournie à la plaque pour maintenir sa température au niveau de la température cible, elle atteint sa valeur maximale de $1,1\text{ W/dm}^2$ après 18 minutes. Durant les 20 premières minutes le système est dans le régime transitoire. Par la suite, le régime permanent s'installe où la température de la plaque oscille autour d'une valeur moyenne de $-15,6\text{ °C}$, tandis que la puissance diminue, car le système de contrôle essaie de stabiliser la température de la plaque à la température cible de $-16,1\text{ °C}$. Lorsque la température de la plaque est stabilisée, elle oscille autour de $-15,4\text{ °C}$ durant 13 minutes, tandis que la puissance diminue à une valeur de $0,4\text{ W/dm}^2$. Lorsque le fluide atteint son temps d'endurance, la puissance est pratiquement nulle et la température de la plaque tend vers une valeur constante de $-15,6\text{ °C}$ et celle du fluide à une valeur de $-15,3\text{ °C}$. L'écart de la température moyenne entre la plaque et l'air est de $1,8\text{ °C}$ et celle entre le fluide et la plaque est de $0,4\text{ °C}$.

Sous l'intensité moyenne de précipitations de neige qui est de $25,4 \pm 13,1\text{ g/dm}^2/\text{h}$, la masse du fluide augmente comme le montre la **Figure 68**. La neige accumulée durant l'essai (33 minutes) de masse de 211,4 g, est absorbée par le fluide, celle-ci fond et se diffuse dans le fluide amenant la diminution de la concentration en propylène glycol qui est provoquée par la dilution du fluide. Cela augmente graduellement le point de solidification du fluide au cours d'un essai, qui débute à une valeur de $-25,7\text{ °C}$ pour se terminer à une valeur de $-12,0\text{ °C}$ comme on peut le voir à la **Figure 67**. La concentration du fluide débute à 44 %,

diminue graduellement pour atteindre une concentration de 32,9 % à la 21^e minute correspondant au croisement de la température du fluide mesurée (-15,2 °C) et de la température de solidification calculée à partir de la concentration. La concentration de fluide en propylène glycol à l'échec est de 28,8 %.

Le croisement des températures du fluide et de solidification qui se produit à la 21^e minute correspond au temps où la puissance fournie commence à diminuer.

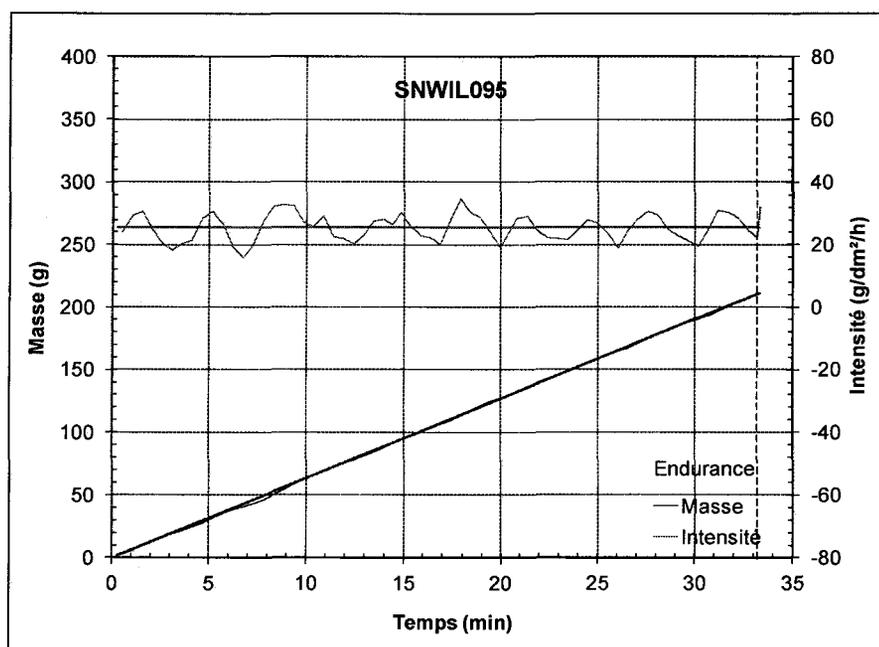


Figure 68 : Évolution de l'intensité des précipitations et de la masse de neige dans le temps pour l'essai SNWIL095

– Essai SNWIL104

La **Figure 69** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque, du fluide, de la température de solidification calculée à partir de la concentration en propylène glycol du fluide et celle calculée à partir de la concentration obtenue avec le réfractomètre et de la

puissance fournie lors de l'essai SNWIL104. La **Figure 70** présente l'évolution de la masse et de l'intensité en fonction du temps.

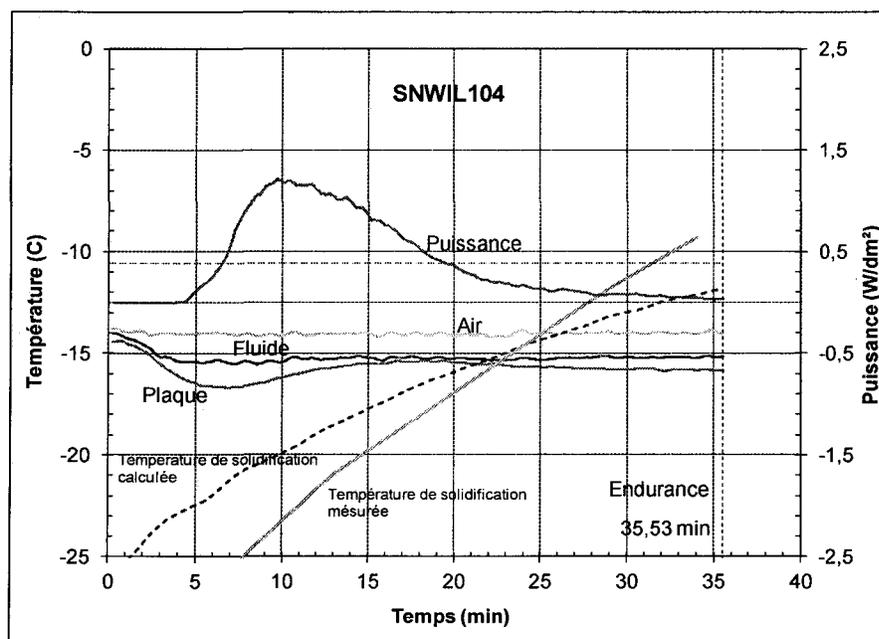


Figure 69 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL104

Comme on peut le voir à la **Figure 69**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de -14 °C avec de légères fluctuations tout au long de l'essai d'incertitude de $0,2\text{ °C}$. La température de la plaque débute à $-14,4\text{ °C}$, décroît rapidement à une valeur minimale de $-16,7\text{ °C}$, pour remonter légèrement et se stabiliser à une valeur moyenne de $-15,7\text{ °C}$. La température du fluide qui possède un comportement similaire à celle de la plaque, mais qui décroît plus lentement, débute à la température de $-14,0\text{ °C}$, décroît à une valeur minimale de $-15,5\text{ °C}$ pour remonter légèrement et se stabiliser à une valeur moyenne de $-15,2\text{ °C}$. La seule différence majeure entre le comportement de la température du fluide avec celle de la plaque est que durant la transition la température du

fluide diminue plus lentement que celle de la plaque. La diminution de température de la plaque est compensée par une augmentation de puissance pour ramener la température de la plaque à la température cible de $-16,1\text{ °C}$.

La puissance débute à zéro, à la 4^e minute, de la puissance est fournie à la plaque pour maintenir sa température au niveau de la température cible, elle atteint sa valeur maximale de $1,2\text{ W/dm}^2$ après 11 minutes. Durant les 17 premières minutes le système est dans le régime transitoire. Par la suite, le régime permanent s'installe où la température de la plaque oscille autour d'une valeur moyenne de $-15,8\text{ °C}$, tandis que la puissance diminue, car le système de contrôle essaie de stabiliser la température de la plaque à la température cible de $-16,1\text{ °C}$. Lorsque la température de la plaque est stabilisée, elle oscille autour de $-15,7\text{ °C}$ durant 18 minutes, tandis que la puissance diminue à une valeur de $0,2\text{ W/dm}^2$. Lorsque le fluide atteint son temps d'endurance, qui est de 35,3 minutes, la puissance est pratiquement nulle et la température de la plaque tend vers une valeur constante de $-15,8\text{ °C}$ et celle du fluide à une valeur de $-15,2\text{ °C}$. L'écart de la température moyenne entre la plaque et l'air est de $1,8\text{ °C}$ et celle entre le fluide et la plaque de $0,6\text{ °C}$.

Sous l'intensité moyenne de précipitations de neige qui est de $24,6 \pm 23,8\text{ g/dm}^2/\text{h}$, la masse du fluide augmente comme on peut le voir à la **Figure 70**. La neige accumulée durant l'essai (35,3 minutes) de masse de 217,7 g est absorbée par le fluide, celle-ci fond et se diffuse dans le fluide amenant la diminution de la concentration en propylène glycol qui est provoquée par la dilution du fluide. Cela augmente graduellement le point de solidification du fluide au cours d'un essai, qui débute à une valeur de $-25,7\text{ °C}$ pour se terminer à une valeur de $-11,8\text{ °C}$ comme le montre la **Figure 69**. La concentration du fluide débute à

44 % et diminue graduellement pour atteindre une concentration de 32,9 % à la 22^e minute, correspondant au croisement de la température du fluide mesurée (-15,0 °C) et de la température de solidification calculée à partir de la concentration. La concentration de fluide en propylène glycol à l'échec est de 28,5 %.

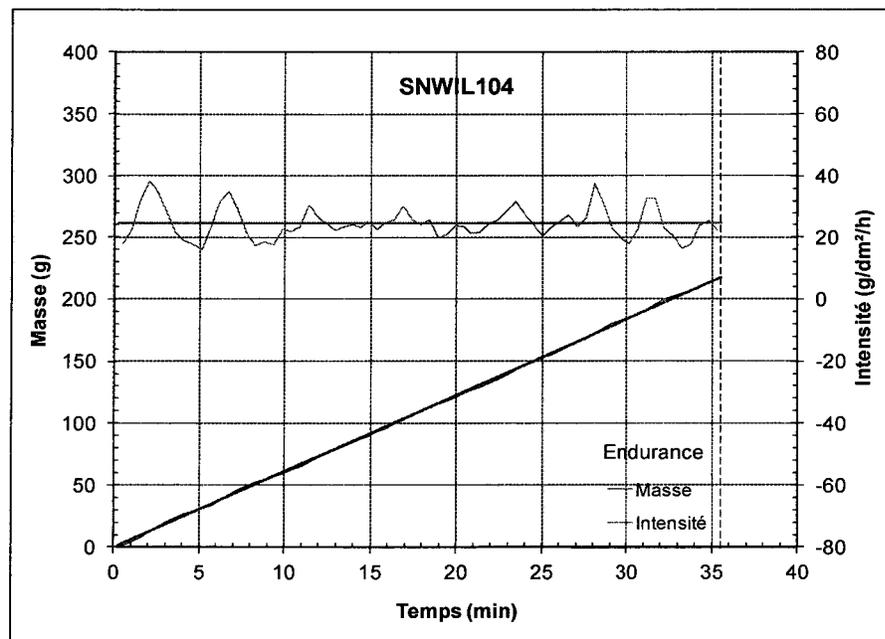


Figure 70 : Évolution de l'intensité des précipitations et de la masse de neige dans le temps pour l'essai SNWIL104

Le croisement des températures du fluide et de solidification qui se produit à la 22^e minute correspond au temps où la puissance fournie commence à diminuer.

Le **Tableau 7** présente les concentrations mesurées expérimentalement durant les essais ainsi que celles calculées et la température de solidification du fluide correspondante.

Tableau 7 : Concentration et température de solidification expérimentale et calculée de propylène glycol durant l'essai

Minute	Concentration			Température de solidification		
	Expérimentale	Calculée	Erreur relative	Expérimentale	Calculée	Erreur relative
13	39,3	36,8	7 %	-20,9	-18,5	12 %
29	28,5	30,4	6 %	-11,8	-13,2	11 %
34	24,9	29,0	15 %	-9,3	-12,1	26 %

L'erreur relative entre les concentrations en propylène glycol expérimentales et calculées, qui est de l'ordre de 7 %, augmente à l'échec (15 %). Cette différence est due à l'imprécision des appareils de mesure. C'est un comportement similaire pour la température de solidification, alors que l'erreur relative pour les premières minutes est égale à 12 % et diminue au cours de l'essai pour terminer à une valeur de 26 %.

3.3.2.2 Température de l'air de -25 °C et de la plaque de -27,1 °C

Les résultats présentés dans cette section correspondent aux essais réalisés avec la condition 8 où la température de la plaque est de -27,1 °C. Pour cette condition, quatre essais ont été réalisés. Pour les quatre essais, la température du fluide est mesurée, et pour les deux derniers un réfractomètre est utilisé pour mesurer la concentration en propylène glycol et la comparer avec celle calculée théoriquement. Un seul essai pour chaque type est présenté dans cette section; les autres sont présentés à l'Annexe B.

– Essai SNWIL 099

La **Figure 71** présente l'évolution des températures de l'air, de la plaque, du fluide, de la température de solidification calculée à partir de la concentration en propylène glycol du

fluide et de la puissance fournie lors de l'essai SNWIL099. La **Figure 72** présente l'évolution de la masse et de l'intensité en fonction du temps.

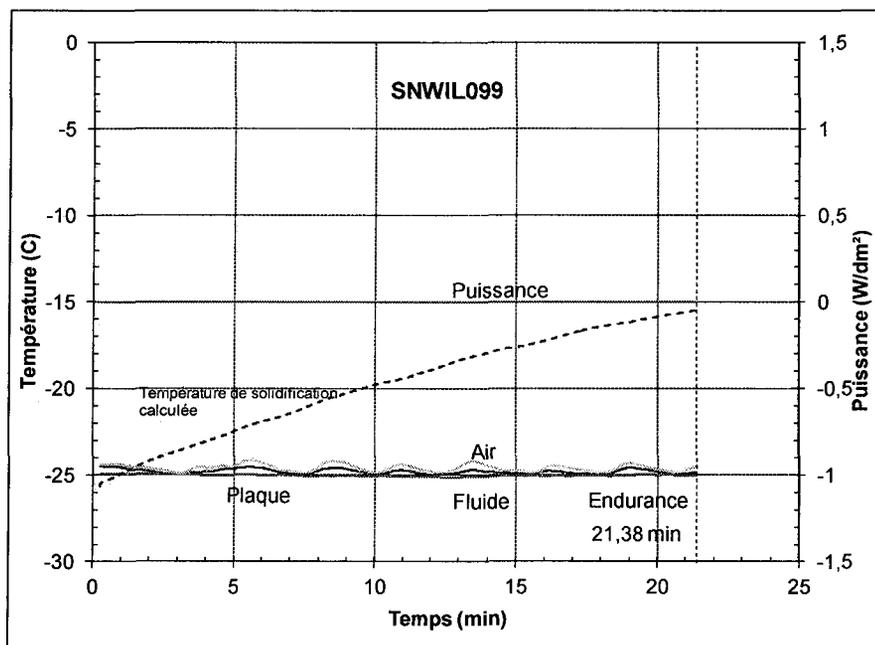


Figure 71 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL099

Comme le montre la **Figure 71**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de $-24,6\text{ °C}$, avec une variation de $0,4\text{ °C}$ tout au long de l'essai dues au contrôle de la chambre climatique. La température de la plaque débute à $-24,9\text{ °C}$ et reste constante avec une valeur moyenne de -25 °C . Aucune puissance n'est fournie à la plaque tout au long de l'essai pour maintenir sa température.

La température du fluide possède un comportement similaire à celui de la température de la plaque avec une température moyenne de $-24,8\text{ °C}$ durant 21 minutes. Le point de solidification du fluide augmente avec les précipitations de neige en raison de la diminution de la concentration en propylène glycol dans le fluide au cours d'un essai. La concentration

en propylène glycol passe de 44 % à 33,2 %, ce qui entraîne une augmentation du point de solidification de $-25,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $-15,48\text{ }^{\circ}\text{C}$.

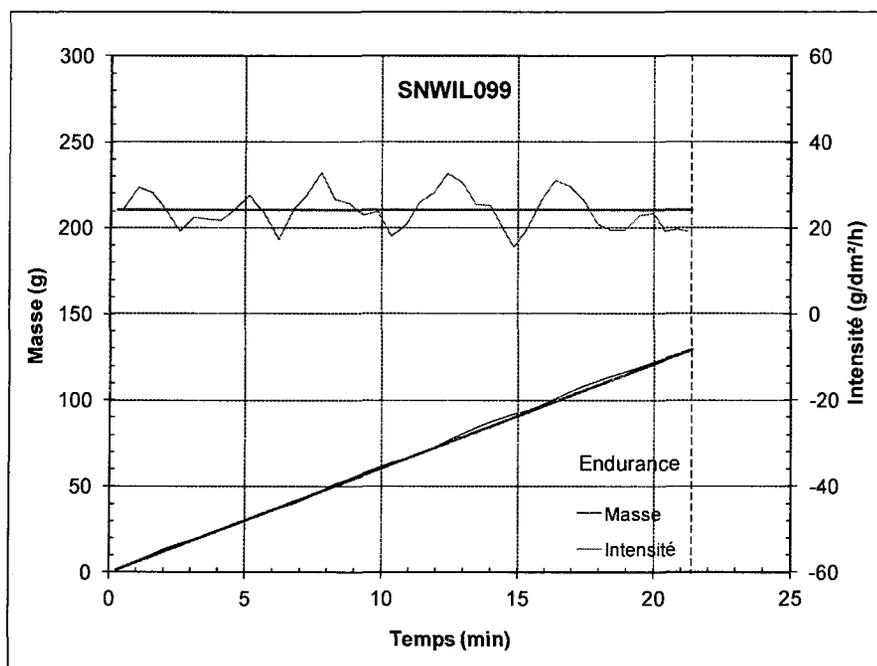


Figure 72 : Évolution de l'intensité des précipitations et de la masse de neige dans le temps pour l'essai SNWIL099

Sous l'effet de l'intensité moyenne d'enneigement qui est de $24,4 \pm 14,1\text{ g/dm}^2/\text{h}$, la masse cumulée de neige augmente linéairement pour atteindre 129,4 g après 21,38 minutes (Figure 72).

La neige qui s'accumule dans le fluide fond, se diffuse, diluant le propylène glycol, ce qui augmente son point de solidification. Lorsque la concentration atteint 43,2 %, ce qui se produit à la minute 1,16, le point de solidification qui est de $-24,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ croise la température fluide. Lorsque la température du fluide est égale ou inférieure au point de solidification, le fluide débute sa solidification en libérant lentement sa chaleur latente de fusion. Cette

chaleur est suffisante pour maintenir la température de la plaque à la valeur cible ce qui explique que la température de la plaque est maintenue sans apport de puissance, en dépit du fait que de l'énergie est requise pour faire fondre la neige. Pour les deux premières minutes, l'apport de chaleur émane de la masse thermique de fluide qui fournit la chaleur requise par une baisse de sa température. Lorsque le temps atteint 15 minutes, la neige ne fond plus ou fond partiellement et commence à s'accumuler à la surface du fluide. Lorsque 5 dm² sont recouverts, le fluide est en mode échec ce qui se produit à la 21^e minute. Le fluide a terminé de libérer sa chaleur latente de fusion lorsque la neige blanche commence à s'accumuler sur la surface du fluide, qui a une forme pâteuse due au mélange de la neige et du fluide.

– Essai SNWIL107

La **Figure 73** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque, du fluide, de la température de solidification calculée à partir de la concentration en propylène glycol du fluide et celle calculée à partir de la concentration obtenue avec le réfractomètre et de la puissance fournie lors de l'essai SNWIL107. La **Figure 74** présente l'évolution de la masse et de l'intensité en fonction du temps.

Comme le montre la **Figure 73**, la température de l'air demeure constante durant l'essai à une valeur moyenne de -24,6 °C, avec une variation de 0,2 °C tout au long de l'essai dues au contrôle de la chambre climatique. La température de la plaque débute à -24,8 °C et reste constante avec une valeur moyenne de -25,0 °C. Aucune puissance n'est fournie à la plaque tout au long de l'essai pour maintenir sa température.

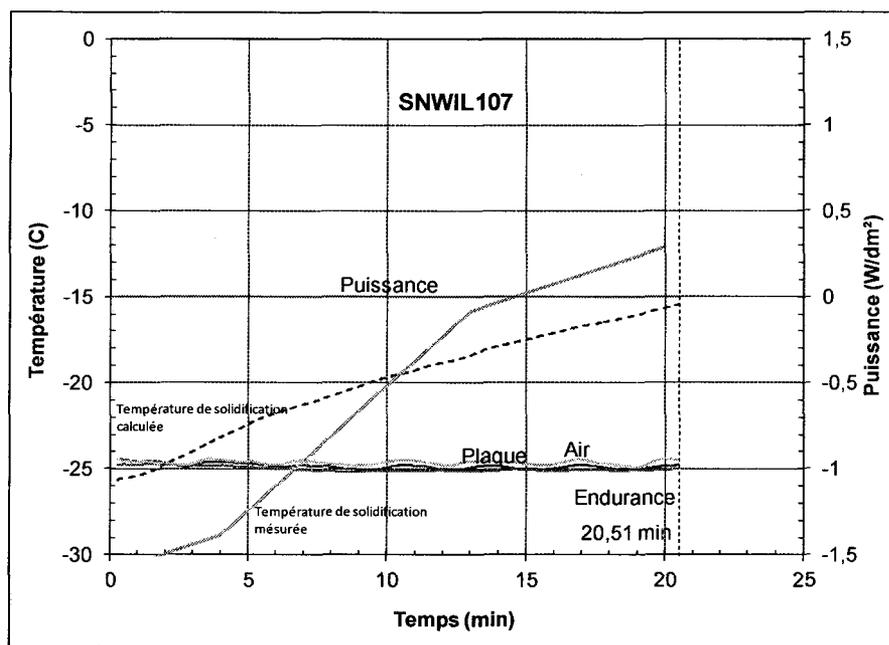


Figure 73 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL107

La température du fluide possède un comportement similaire à celui de la plaque avec une température moyenne de $-25,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ durant 20 minutes. Le point de solidification du fluide augmente avec les précipitations de neige en raison de la diminution de la concentration de propylène glycol dans le fluide au cours d'un essai. La concentration en propylène glycol passe de 44 % à 33,2 %, ce qui entraîne une augmentation du point de solidification de $-25,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $-15,43\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Sous l'effet de l'intensité moyenne d'enneigement qui est de $25,7 \pm 17,5\text{ g/dm}^2/\text{h}$, la masse cumulée de neige augmente linéairement pour atteindre 130,4 g après 20,51 minutes (Figure 74).

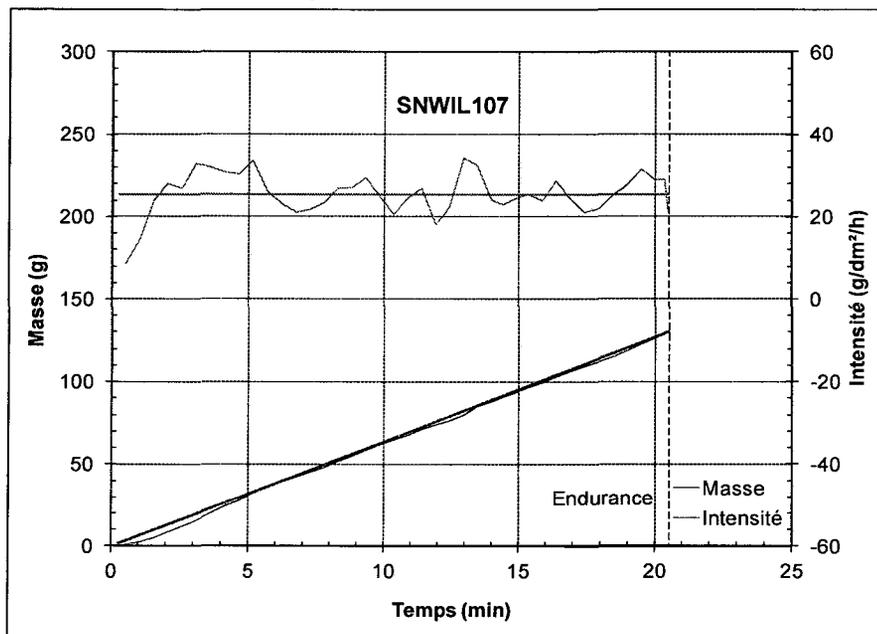


Figure 74 : Évolution de l'intensité et de la masse de neige précipitée en fonction du temps pour l'essai SNWIL107

La neige qui s'accumule dans le fluide fond, se diffuse, diluant le propylène glycol, ce qui augmente son point de solidification. Lorsque la concentration atteint 43,3 %, ce qui se produit à la minute 1,82, le point de solidification qui est de $-24,9\text{ °C}$ croise la température fluide. Lorsque la température du fluide est égale ou inférieure au point de solidification, le fluide débute sa solidification en libérant lentement sa chaleur latente de fusion. Cette chaleur est suffisante pour maintenir la température de la plaque à la valeur cible, ce qui explique pourquoi la température de la plaque est maintenue sans apport de puissance, en dépit du fait que de l'énergie est requise pour faire fondre la neige. Pour les deux premières minutes, l'apport de chaleur émane de la masse thermique du fluide qui fournit la chaleur requise par une baisse de sa température. Lorsque le temps atteint 15 minutes, la neige ne fond plus ou fond partiellement et commence à s'accumuler à la surface du fluide. Lorsque

5 dm² sont recouverts, le fluide est en mode échec ce qui se produit à la 20^e minute. Le fluide a terminé de libérer sa chaleur latente de fusion lorsque la neige blanche commence à s'accumuler sur la surface du fluide, qui a une forme pâteuse due au mélange de la neige et du fluide.

Le **Tableau 8** présente les concentrations et les températures de solidification mesurées expérimentalement durant les essais.

Tableau 8 : Concentration et température de solidification expérimentale et calculée de propylène glycol durant l'essai

Minute	Concentration			Température de solidification		
	Expérimentale (%)	Calculée (%)	Erreur relative	Expérimentale (°C)	Calculée (°C)	Erreur relative
4	46,9	41,6	12 %	-28,9	-23,2	22 %
13	33,7	36,6	8 %	-15,9	-18,4	15 %
20	28,9	33,4	14 %	-12,1	-15,6	25 %

L'erreur relative entre les concentrations en propylène glycol expérimentales et calculées, qui est de l'ordre de 12 %, diminue avec le temps et augmente à l'échec (14 %). Cette différence est due à l'imprécision des appareils de mesure. C'est un comportement similaire pour la température de solidification, alors que l'erreur relative pour les premières minutes est égale à 22 % et diminue au cours de l'essai pour terminer à une valeur de 25 %.

CHAPITRE IV
INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

CHAPITRE IV

INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

4.1 Essais réalisés

Les résultats des 33 essais retenus dans la première série ainsi que les 14 résultats retenus dans la deuxième série d'essais sont résumés au **Tableau 9**. Ce dernier présente le numéro de l'essai, la condition simulée, le type de trou du cylindre, la concentration en propylène glycol, la masse de neige ainsi que les valeurs mesurées d'intensité, de température de l'air et de la plaque, de puissance de chauffage, du temps d'endurance et du nombre adimensionnel ISTDN (Indoor Snow Test Dimensionless Number) basé sur la masse de neige accumulée et la masse de fluide.

Tableau 9 : Résultats expérimentaux des 47 essais

Essai	C d	Trous	Date Journée	Concentration glycol	Intensité de neige		Température				Puissance		Temps Endurance		ISTDN
					Taux g/dm ² /h	Masse g/dm ²	Air		Plaque		Moyenne W/dm ²	Max W/dm ²	Min	sec	
							Moyenne °C	Min °C	Permanent °C	Max °C					
071	1	P	2009-11-20	0,134	10,6±15,5	61,02	-5,9±0,3	-5,3	-4,5±0,6	-4,2	0,50±0,60	1,20	345	29	2,195
079	1	P	2009-12-09	0,133	10,4±12,8	61,69	-4,6±0,9	-5,3	-4,5±0,5	-4,2	0,60±0,70	1,45	354	53	2,219
077	1	G	2009-11-23	0,164	10,0±8,3	45,15	-5,4±0,5	-4,8	-4,3±0,4	-3,9	0,60±0,70	1,40	266	28	1,624
084	1	G	2009-12-17	0,159	10,4±17,6	47,11	-5,5±0,8	-5,3	-5,5±0,8	-4,1	0,50±0,80	1,50	270	52	1,695
060	2	P	2009-11-13	0,225	10,7±10,0	25,44	-11,0±0,2	-9,5	-9,2±0,3	-8,9	0,20±0,40	0,70	128	41	0,915
062	2	P	2009-11-16	0,243	10,5±7,7	21,67	-11,1±0,2	-11,2	-10,7±0,1	-9,5	0,20±0,30	0,60	118	09	0,780
058	2	G	2009-11-12	0,244	9,9±6,2	21,37	-10,9±0,2	-11,2	-10,8±0,1	-9,4	0,20±0,40	0,80	125	14	0,509
059	2	G	2009-11-12	0,251	10,0±6,7	20,11	-11,0±0,2	-11,3	-10,9±0,0	-10,0	0,20±0,40	0,80	114	30	0,724
069	3	P	2009-11-18	0,282	10,4±9,2	14,93	-15,2±0,3	-14,7	-14,3±0,5	-13,6	0,20±0,20	0,50	77	38	0,537
067	3	G	2009-11-18	0,278	9,9±3,4	15,55	-15,2±0,4	-14,7	-14,3±0,4	-13,9	0,10±0,30	0,60	74	30	0,559
090	3	P	2010-07-22	0,286	9,8±15,9	14,43	-14,0±0,5	-15,5	-15,0±0,5	-14,5	0,28±0,33	0,65	88	00	0,519
092	3	P	2010-07-23	0,280	10,2±14,9	15,28	-14,0±0,5	-15,4	-14,8±0,6	-14,2	0,29±0,42	0,83	89	00	0,550
102	3	P	2010-07-28	0,284	10,6±14,9	14,73	-14,0±0,4	-15,6	-14,7±1,0	-13,7	0,30±0,50	0,99	83	45	0,530
103	3	P	2010-07-29	0,287	10,2±15,1	14,25	-14,8±0,5	-15,3	-14,1±0,9	-13,6	0,30±0,54	1,07	84	0	0,512
047	4	P	2009-11-04	0,341	9,7±7,8	7,75	-25,8±0,1	-22,7	-22,5±0,1	-22,4	0,00±0,00	0,00	44	00	0,279
048	4	P	2009-11-04	0,344	10,3±14,2	7,40	-25,7±0,1	-22,6	-22,5±0,1	-22,4	0,00±0,00	0,00	41	57	0,267
049	4	G	2009-11-04	0,341	10,7±15,6	7,69	-25,7±0,1	-22,5	-22,5±0,5	-22,5	0,00±0,00	0,00	41	25	0,276
046	4	G	2009-11-04	0,331	9,7±7,8	8,79	-25,9±0,1	-22,6	-22,5±0,1	-22,3	0,00±0,00	0,00	45	30	0,316
109	4	P	2010-08-02	0,351	10,0±8,6	6,80	-25,1±0,5	-25,0	-24,7±0,4	-24,2	0,00±0,00	0,00	40	40	0,244
106	4	P	2010-07-30	0,349	9,9±14,2	7,08	-25,1±0,5	-25,0	-24,7±0,4	-24,2	0,00±0,00	0,00	42	20	0,255
072	5	P	2009-11-20	0,154	25,4±14,7	49,75	-5,7±0,3	-5,6	-3,9±1,2	-3,3	1,30±1,10	2,30	114	49	1,789
080	5	P	2009-12-10	0,126	24,6±29,6	66,38	-5,3±1,3	-5,4	-4,5±0,7	-4,0	1,00±1,10	2,20	161	42	2,387
075	5	G	2009-11-23	0,175	23,9±17,1	40,59	-5,5±0,3	-6,1	-4,5±1,1	-3,9	1,10±1,10	2,30	101	17	1,460
081	5	G	2009-12-10	0,137	23,8±20,3	59,05	-5,4±1,2	-5,4	-4,5±0,7	-4,0	1,00±1,10	2,20	149	12	2,124
041	6	P	2009-11-02	0,238	24,7±7,9	22,67	-11,2±0,4	-12,0	-11,1±0,2	-9,0	0,40±0,60	1,20	50	00	0,815
042	6	P	2009-11-02	0,252	25,1±3,1	20,29	-11,1±0,4	-12,2	-11,1±0,2	-10,0	0,50±0,80	1,60	45	00	0,730
061	6	G	2009-11-13	0,230	24,8±5,1	24,39	-10,9±0,2	-9,6	-9,2±0,4	-8,7	0,40±0,80	1,60	53	34	0,877
063	6	G	2009-11-16	0,254	24,8±6,3	19,56	-11,1±0,2	-9,8	-9,4±0,4	-9,0	0,30±0,50	1,10	44	25	0,703
039	7	P	2009-10-30	0,278	25,6±12,3	15,54	-14,9±0,1	-15,4	-14,7±0,1	-12,7	0,10±0,30	0,50	32	48	0,559
065	7	P	2009-11-17	0,283	24,8±6,9	14,84	-15,1±0,2	-13,3	-12,9±0,3	-12,7	0,40±0,40	0,90	35	00	0,534
064	7	G	2009-11-17	0,276	25,3±11,8	15,88	-15,1±0,1	-13,3	-12,9±0,3	-12,7	0,30±0,40	0,90	34	58	0,571
066	7	G	2009-11-18	0,239	25,0±15,6	22,52	-15,1±0,2	-13,3	-13,0±0,2	-12,8	0,20±0,30	0,70	49	17	0,810
095	7	P	2010-07-26	0,288	25,4±13,1	14,02	-13,8±0,2	-16,5	-15,6±1,4	-13,7	0,37±0,54	1,07	33	11	0,507
096	7	P	2010-07-26	0,262	25,3±19,9	18,79	-14,0±0,4	-16,4	-15,6±1,1	-14,1	0,32±0,53	1,05	43	30	0,676
104	7	P	2010-07-29	0,285	24,6±14,6	14,51	-14,0±0,2	-16,7	-15,8±1,1	-14,4	0,39±0,61	1,22	35	32	0,522
105	7	P	2010-07-29	0,280	24,6±12,6	15,31	-14,0±0,2	-16,6	-15,8±0,7	-15,2	0,56±0,81	1,62	37	30	0,551
053	8	P	2009-11-05	0,321	24,3±2,5	9,89	-25,7±0,4	-22,8	-22,6±0,2	-22,4	0,00±0,00	0,00	24	14	0,356
054	8	P	2009-11-11	0,299	24,8±3,1	12,60	-25,6±0,12	-22,8	-22,6±0,2	-22,3	0,00±0,00	0,00	21	43	0,453
056	8	P	2009-11-11	0,299	24,9±3,1	12,60	-25,7±0,0	-22,8	-22,6±0,2	-22,4	0,00±0,00	0,00	25	52	0,453
050	8	G	2009-11-05	0,326	25,8±8,3	9,31	-25,7±0,5	-22,5	-22,4±0,1	-22,3	0,00±0,00	0,00	20	16	0,335
051	8	G	2009-11-05	0,332	26,6±11,2	8,63	-25,7±0,1	-22,6	-22,5±0,1	-22,4	0,00±0,00	0,00	19	33	0,310
055	8	G	2009-11-11	0,308	23,6±7,2	11,36	-25,8±0,0	-22,8	-22,7±0,1	-22,6	0,00±0,00	0,00	24	30	0,409
057	8	G	2009-11-11	0,327	24,7±4,0	9,17	-25,7±0,0	-22,6	-22,5±0,1	-22,3	0,00±0,00	0,00	20	00	0,330
098	8	P	2010-07-27	0,324	24,4±17,3	9,61	-24,7±0,3	-25,1	-25,0±0,2	-24,7	0,00±0,00	0,00	23	26	0,346
099	8	P	2010-07-27	0,332	24,2±12,9	8,63	-24,6±0,4	-25,2	-25,0±0,1	-24,9	0,00±0,00	0,00	21	23	0,310
107	8	P	2010-07-30	0,332	25,7±17,5	8,69	-24,6±0,2	-25,2	-25,0±0,2	-24,7	0,00±0,00	0,00	20	31	0,313
108	8	P	2010-07-30	0,330	25,4±20,3	8,92	-24,6±0,3	-25,5	-25,3±0,4	-24,7	0,00±0,00	0,00	21	0	0,321

4.2 Reproductibilité des essais

La reproductibilité des essais est une condition essentielle à la qualité scientifique des résultats obtenus lors des expérimentations. Les variations de température de l'air dans la chambre climatique, dues au système de contrôle, impliquent des variations de température du fluide et de la plaque ainsi que de la consommation de puissance de l'élément chauffant. Il est difficile d'obtenir deux essais avec des conditions de température identiques. Dans cette section, la moyenne, l'écart et l'erreur relative pour tous les essais réalisés sont présentés.

4.2.1 Intensité de 10 g/dm²/h

4.2.1.1 Température de l'air de -5 °C et de la plaque de -4,2 °C

– Boîte à neige avec de petits trous

Deux essais ont été effectués pour la condition 1 avec une boîte à petits trous afin de confirmer si l'essai est répétitif. Le **Tableau 10** résume les résultats de ces deux essais. Les deux essais sont presque identiques en intensité de précipitations et de masse de neige cumulée, mais la température de l'air est différente de 1,3 °C, ce qui a un impact sur la puissance maximum avec un écart de 0,25 W/dm², mais peu d'impact sur la puissance moyenne (0,03 W/dm²) et sur le temps d'endurance qui diffèrent de 9 minutes et 24 secondes.

Tableau 10 : Résultat pour la condition 1 avec un cylindre à petits trous

	Intensité de neige		Température				Puissance		Temps Endurance	ISTDN	T-Solidif (°C)	C (%)
	Taux	Masse	Air	Plaque			Moy	Max				
	g/dm ² /h	g/dm ²	Moy °C	Min °C	Per °C	Max °C			W/dm ²			
071	10,6	61,02	-5,9	-5,3	-4,5	-4,2	0,53	1,20	345,48	2,195	-3,3	13,4
079	10,4	61,70	-4,6	-5,3	-4,5	-4,2	0,56	1,45	354,88	2,219	-3,3	13,3
Moyenne	10,5	61,36	-5,3	-5,3	-4,5	-4,2	0,54	1,33	350,18	2,207	-3,3	13,4
Écart	0,2	0,68	1,3	0,0	0,0	0,0	0,03	0,25	9,40	0,024	0,0	0,1
Erreur relative (%)	1,9	1,11	24,8	0,0	0,0	0,0	5,50	18,87	2,68	1,1	0,0	0,7

– Boîte à neige avec de gros trous

Deux essais ont été effectués pour la condition 1 avec une boîte à gros trous afin de confirmer si l'essai est répétitif. Le **Tableau 11** résume les résultats de ces deux essais. Les deux essais sont presque identiques en intensité de précipitations et de température de la plaque, mais la masse de neige cumulée est différente de 1,9 g/dm², ce qui a un impact sur les puissances moyenne et maximum, un écart de 0,11 et 0,19 W/dm², et sur le temps d'endurance, de 4 minutes et 24 secondes.

Tableau 11 : Résultat pour la condition 1 avec un cylindre à gros trous

	Intensité de neige		Température				Puissance		Temps Endurance	ISTDN	T-Solidif (°C)	C (%)
	Taux	Masse	Air	Plaque			Moy	Max				
	g/dm ² /h	g/dm ²	Moy °C	Min °C	Per °C	Max °C			W/dm ²			
077	10,0	45,2	-5,4	-4,8	-4,3	-3,9	0,58	1,36	266,46	1,624	-4,6	16,4
084	10,4	47,1	-5,5	-5,4	-4,5	-4,1	0,47	1,55	270,86	1,695	-4,4	15,9
Moyenne	10,2	46,2	-5,5	-5,1	-4,4	-4,0	0,53	1,46	268,66	1,660	-4,5	16,2
Écart	0,4	1,9	0,1	0,6	0,2	0,2	0,11	0,19	4,40	0,071	0,2	0,5
Erreur relative (%)	3,9	3,3	1,8	11,8	4,5	5,0	20,95	13,06	1,64	4,3	4,4	3,1

4.2.1.2 Température de l'air de -10 °C et de la plaque de -11,2 °C

– Boîte à neige avec de petits trous

Deux essais ont été effectués pour la condition 2 avec une boîte à petits trous afin de confirmer si l'essai est répétitif. Le **Tableau 12** présente les résultats de ces deux essais. Les deux essais sont presque identiques en intensité de précipitations et de masse de neige cumulée, mais la masse de neige cumulée est différente de 3,8 g/dm² et la température de la plaque est différente de 1,5 °C, ce qui a un impact sur la puissance maximum, qui augmente de 0,1 W/dm², et sur le temps d'endurance qui augmente de 10 minutes 33 secondes.

Tableau 12 : Résultat pour la condition 2 avec un cylindre à petits trous

	Intensité de neige		Température				Puissance		Temps Endurance min	ISTDN	T-Solidif (°C)	C (%)
	Taux	Masse	Air	Plaque			Moy	Max				
	g/dm ² /h	g/dm ²	Moy °C	Min °C	Per °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²				
060	10,7	25,4	-11,0	-9,5	-9,2	-8,9	0,2	0,7	128,7	0,915	-7,86	22,5
062	10,5	21,7	-11,1	-11,2	-10,7	-9,5	0,2	0,6	118,2	0,780	-8,94	24,3
Moyenne	10,6	23,6	-11,1	-10,4	-10,0	-9,2	0,2	0,7	123,4	0,848	-8,40	23,4
Écart	0,2	3,8	0,1	1,7	1,5	0,6	0,0	0,1	10,6	0,135	1,08	1,8
Erreur relative (%)	1,9	16,0	0,9	16,4	15,1	6,5	0,0	15,4	8,5	16	12,86	7,7

– Boîte à neige avec de gros trous

Deux essais ont été effectués pour la condition 2 avec une boîte à gros trous afin de confirmer si l'essai est répétitif. Le **Tableau 13** présente les résultats de ces deux essais. Les deux essais sont presque identiques en intensité de précipitations, de masse de neige cumulée et de température de l'air et de la plaque. Une différence de temps d'endurance est de l'ordre de 10 minutes 44 secondes.

Tableau 13 : Résultat pour la condition 2 avec un cylindre à gros trous

	Intensité de neige		Température				Puissance		Temps Endurance	ISTDN	T-Solidif (°C)	C (%)
	Taux	Masse	Air		Plaque		Moy	Max				
	g/dm ² /h	g/dm ²	Moy °C	Min °C	Per °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²	min			
058	9,9	21,4	-10,9	-11,2	-10,7	-9,5	0,2	0,8	125,23	0,509	-9,0	24,4
059	10,0	20,1	-11,0	-11,3	-10,8	-10,0	0,2	0,8	114,50	0,724	-9,5	25,1
Moyenne	10,0	20,7	-11,0	-11,3	-10,8	-9,8	0,2	0,8	119,90	0,617	-9,3	24,8
Écart	0,1	1,3	0,1	0,1	0,1	0,5	0,0	0,0	10,73	0,215	0,5	0,7
Erreur relative (%)	1,0	6,1	0,9	0,9	0,9	5,1	0,0	0,0	8,95	35	5,4	2,8

4.2.1.3 Température de l'air de -14 °C et de la plaque de -15,2 °C

Dans cette section, la moyenne, l'écart-type et l'incertitude entre les résultats obtenus pour une température de l'air de -14 °C et de la plaque de -15,2 °C sont calculés et présentés au **Tableau 14**. Un essai a été effectué durant la série des essais principaux, et quatre autres durant la série des essais complémentaires. L'intensité moyenne est de $10,3 \pm 0,4$ g/dm²/h, correspondant à une masse de $14,7 \pm 0,4$ g/dm² obtenue après un temps de $84,5 \pm 5,7$ minutes. La température moyenne de l'air est de $-14,4 \pm 0,6$ °C, celle de la plaque durant le régime permanent est de $-14,6 \pm 0,5$ °C, les puissances moyenne et maximum requises sont de $0,27 \pm 0,06$ W/dm² et $0,80 \pm 0,24$ W/dm², avec une concentration finale en propylène glycol en moyenne de $28,4 \pm 0,4$ % correspondant à une température de solidification finale de $-11,7 \pm 0,3$ °C.

Tableau 14 : Résultat pour la condition 3 avec un cylindre à petits trous

	Intensité de neige		Température							Puissance		Temps Endurance	ISTDN	T Solidif (°C)	C (%)
	Taux	Masse	Air	Plaque			Fluide			Moy	Max				
	g/dm ³ /h	g/dm ²	Moy °C	Min °C	Per °C	Max °C	Min °C	Per °C	Max °C	Moy W/dm ²	Max W/dm ²	min			
069	10,4	14,9	-15,2	-14,7	-14,3	-13,6	-	-	-	0,16	0,48	77,6	0,537	-11,6	28,2
090	9,8	14,4	-14,0	-15,5	-15,0	-14,5	-15,3	-14,8	-14,4	0,28	0,65	88,0	0,519	-11,8	28,6
092	10,3	15,2	-14,0	-15,4	-14,8	-14,2	-15,1	-14,7	-13,9	0,29	0,83	89,0	0,559	-11,4	28,0
102	10,6	14,7	-14,0	-15,6	-14,7	-13,7	-15,4	-14,6	-13,6	0,30	0,99	83,8	0,530	-11,7	28,4
103	10,2	14,3	-14,8	-15,3	-14,1	-13,6	-15,3	-14,8	-14,3	0,30	1,07	84,0	0,512	-11,9	28,7
Moyenne	10,3	14,7	-14,4	-15,3	-14,6	-13,9	-15,3	-14,7	-14,1	0,27	0,80	84,5	0,535	-11,7	28,4
Écart type	0,3	0,4	0,6	0,4	0,4	0,4	0,1	0,1	0,4	0,06	0,24	4,5	0,019	0,2	0,3
Incertitude	±0,4	±0,4	±0,6	±0,5	±0,5	±0,5	±0,2	±0,1	±0,4	±0,07	±0,30	±5,7	±0,024	±0,3	±0,4

4.2.1.4 Température de l'air de -25 °C et de la plaque de -26,2 °C

– Boîte à neige avec de petits trous

Dans cette section, la moyenne, l'écart-type et l'incertitude entre les résultats obtenus pour une température de l'air de -25 °C et de la plaque de -26,2 °C sont calculés et présentés au **Tableau 15**. Deux essais ont été effectués durant la série des essais principaux, et les deux autres durant la série des essais complémentaires. L'intensité moyenne est de $10,0 \pm 0,3$ g/dm³/h, correspondant à une masse de $7,26 \pm 0,48$ g/dm² obtenue après un temps de $42,24 \pm 1,67$ minutes. La température moyenne de l'air est de $-25,4 \pm 0,4$ °C, celle de la plaque durant le régime permanent est de $-23,6 \pm 1,1$ °C, avec une concentration finale en propylène glycol en moyenne de $34,7 \pm 0,5$ % correspondant à une température de solidification finale de $-16,7 \pm 0,4$ °C.

Tableau 15 : Résultat pour la condition 4 avec un cylindre à petits trous

	Intensité de neige		Température							Puissance		Temps Endurance min	ISTDN	T-Solidif (°C)	C (%)
	Taux	Masse	Air				Plaque			Fluide					
	g/dm ² /h	g/dm ²	Moy	Min	Per	Max	Min	Per	Max	Moy	Max				
			°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	W/dm ²	W/dm ²				
047	9,7	7,75	-25,8	-22,7	-22,5	-22,4	-	-	-	0,0	0,0	44,00	0,279	-16,2	34,1
048	10,3	7,40	-25,7	-22,6	-22,5	-22,4	-	-	-	0,0	0,0	41,95	0,267	-16,7	34,7
109	10,0	6,80	-25,1	-25,0	-24,7	-24,2	-25,2	-25,0	-24,2	0,0	0,0	40,66	0,244	-17,0	35,1
106	9,9	7,10	-25,1	-25,0	-24,7	-24,2	-25,2	-25,0	-24,2	0,0	0,0	42,33	0,255	-16,7	34,9
Moyenne	10,0	7,26	-25,4	-23,8	-23,6	-23,3	-25,2	-25,0	-24,2	0,0	0,0	42,24	0,261	-16,7	34,7
Écart type	0,3	0,41	0,4	1,4	1,3	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,38	0,015	0,3	0,4
Incertitude	±0,3	±0,48	±0,4	±1,2	±1,1	±0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	±1,67	±0,018	±0,4	±0,5

– Boîte à neige avec de gros trous

Deux essais ont été effectués pour la condition 4 avec une boîte à gros trous afin de confirmer si l'essai est répétitif. Le **Tableau 16** résume les résultats de ces deux essais. Les deux essais sont presque identiques en température de la plaque et de l'air, mais ils montrent une légère différence en intensité de précipitations de 1 g/dm²/h, et la masse de neige cumulée est différente de 1,1 g/dm², ce qui a un léger impact sur le temps d'endurance, de 4 minutes 6 secondes.

Tableau 16 : Résultat pour la condition 4 avec un cylindre à gros trous

	Intensité de neige		Température					Puissance		Temps Endurance min	ISTDN	T-Solidif (°C)	C (%)
	Taux	Masse	Air	Plaque									
	g/dm ² /h	g/dm ²	Moy	Min	Per	Max	Moy	Max					
			°C	°C	°C	°C	W/dm ²	W/dm ²					
049	10,7	7,7	-25,7	-22,5	-22,5	-22,5	0,0	0,0	41,4	0,276	-16,24	34,1	
046	9,7	8,8	-25,9	-22,6	-22,5	-22,3	0,0	0,0	45,5	0,316	-15,35	33,1	
Moyenne	10,2	8,2	-25,8	-22,6	-22,5	-22,4	0,0	0,0	43,5	0,296	-15,80	33,6	
Écart	1,0	1,1	0,2	0,1	0,0	0,2	0,0	0,0	4,1	0,040	0,89	1,0	
Erreur relative (%)	9,8	13,3	0,8	0,4	0,0	0,9	0,0	0,0	9,4	13,5	5,63	3,0	

4.2.2 Intensité de 25 g/dm²/h

4.2.2.1 Température de l'air de -5 °C et de la plaque de -5,1 °C

– Boîte à neige avec de petits trous

Deux essais ont été effectués pour la condition 5 afin de confirmer si l'essai est répétitif. Le **Tableau 17** résume les résultats de ces deux essais. Les deux essais sont presque identiques en intensité de précipitation, mais la masse de neige cumulée est différente de 16,63 g/dm², la température de l'air est différente de 0,4 °C et celle de la plaque est différente de 0,6 °C, ce qui a un impact sur la puissance maximum et moyenne, de 0,1 et 0,3 W/dm², et sur le temps d'endurance, de 46 minutes 53 secondes. La différence en concentration finale en propylène glycol est de 2,8 % correspondant à une différence de température de solidification finale de 1,13 °C.

Tableau 17 : Résultat pour la condition 5 avec un cylindre à petits trous

	Intensité de neige		Température				Puissance		Temps Endurance min	ISTDN	T-Solidif (°C)	C (%)
	Taux	Masse	Air	Plaque			Moy	Max				
	g/dm ² /h	g/dm ²	Moy °C	Min °C	Per °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²				
072	25,4	49,75	-5,7	-5,6	-3,9	-3,3	1,3	2,3	114,81	1,789	-4,16	15,4
080	24,6	66,38	-5,3	-5,4	-4,5	-4,0	1,0	2,2	161,70	2,387	-3,03	12,6
Moyenne	25,0	58,07	-5,5	-5,5	-4,2	-3,7	1,2	2,3	138,26	2,088	-3,60	14,0
Écart	0,8	16,63	0,4	0,2	0,6	0,7	0,3	0,1	46,89	0,598	1,13	2,8
Erreur relative (%)	3,2	28,64	7,3	3,6	14,3	19,2	26,1	4,4	33,92	28,6	31,43	20,0

– Boîte à neige avec de gros trous

Deux essais ont été effectués pour la condition 5 afin de confirmer si l'essai est répétitif. Le **Tableau 18** résume les résultats de ces deux essais. Les deux essais sont presque identiques en intensité de précipitations, mais la masse de neige cumulée est différente de 18,46 g/dm²,

et la température de la plaque est différente de 0,4 °C, ce qui a un impact sur le temps d'endurance, de 47 minutes 54 secondes. La différence en concentration finale en propylène glycol est de 3,8 % correspondant à une différence de température de solidification finale de 1,66 °C.

Tableau 18 : Résultat pour la condition 5 avec un cylindre à gros trous

	Intensité de neige		Température				Puissance		Temps Endurance	ISTDN	T-Solidif (°C)	C (%)
	Taux	Masse	Plaque				Moy	Max				
	g/dm ² /h	g/dm ²	Moy °C	Min °C	Per °C	Max °C			W/dm ²	W/dm ²	min	
075	23,9	40,59	-5,5	-6,1	-4,5	-3,9	1,1	2,3	101,3	1,460	-5,12	17,5
081	23,8	59,05	-5,4	-4,4	-4,9	-4,0	1,1	2,3	149,2	2,124	-3,46	13,7
Moyenne	23,9	49,82	-5,5	-5,3	-4,7	-4,0	1,1	2,3	125,3	1,792	-4,29	15,6
Écart	0,1	18,46	0,1	1,7	0,4	0,1	0,0	0,0	47,9	0,664	1,66	3,8
Erreur relative (%)	0,4	37,05	1,8	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0	38,2	37	38,69	24,4

4.2.2.2 Température de l'air de -10 °C et de la plaque de -12,1 °C

– Boîte à neige avec de petits trous

Deux essais ont été effectués pour la condition 6 afin de confirmer si l'essai est répétitif. Le **Tableau 19** résume les résultats de ces deux essais. Les deux essais sont presque identiques en intensité de précipitations et température de l'air et de la plaque, mais la masse de neige cumulée est différente de 2,4 g/dm², ce qui a un impact sur la puissance maximum et moyenne, de 0,4 et 0,1 W/dm², et sur le temps d'endurance, de 6 minutes 54 secondes. La différence en concentration finale en propylène glycol est de 1,4 % correspondant à une différence de température de solidification finale de 0,9 °C.

Tableau 19 : Résultat pour la condition 6 avec un cylindre à petits trous

	Intensité de neige		Température				Puissance		Temps Endurance	ISTDN	T-Solidif (°C)	C (%)
	Taux	Masse	Air	Plaque			Moy	Max				
	g/dm ² /h	g/dm ²	Moy °C	Min °C	Per °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²	min			
042	25,1	20,3	-11,1	-12,2	-11,3	-10,0	0,50	1,6	48,6	0,730	-9,5	25,2
041	24,7	22,7	-11,2	-12,0	-11,1	-9,0	0,40	1,2	55,5	0,815	-8,6	23,8
Moyenne	24,9	21,5	-11,2	-12,1	-11,2	-9,5	0,45	1,4	52,0	0,773	-9,1	24,5
Écart	0,4	2,4	0,1	0,2	0,2	1,0	0,10	0,4	6,9	0,085	0,9	1,4
Erreur relative (%)	1,6	11,2	0,9	1,7	1,8	10,5	22,22	28,6	13,2	11	9,9	5,7

– **Boîte à neige avec de gros trous**

Deux essais ont été effectués pour la condition 6 afin de confirmer si l'essai est répétitif. Le **Tableau 20** résume les résultats de ces deux essais. Les deux essais sont identiques en intensité de précipitations, et presque identiques en température de l'air et de la plaque, mais la masse de neige cumulée est différente de 4,8 g/dm², ce qui a un impact sur la puissance maximum et moyenne, un écart de 0,5 et 0,1 W/dm², et sur le temps d'endurance, de 9 minutes et 9 secondes. La différence en concentration finale en propylène glycol est de 2,4 % correspondant à une différence de température de solidification finale de 1,6 °C.

Tableau 20 : Résultat pour la condition 6 avec un cylindre à gros trous

	Intensité de neige		Température				Puissance		Temps Endurance	ISTDN	T-Solidif (°C)	C (%)
	Taux	Masse	Air	Plaque			Moy	Max				
	g/dm ² /h	g/dm ²	Moy °C	Min °C	Per °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²	min			
061	24,8	24,4	-10,9	-9,6	-9,2	-8,7	0,4	1,6	53,6	0,877	-8,1	23,0
063	24,8	19,6	-11,1	-9,8	-9,4	-9,0	0,3	1,1	44,4	0,703	-9,7	25,4
Moyenne	24,8	22,0	-11,0	-9,7	-9,3	-8,9	0,4	1,4	49,0	0,790	-8,9	24,2
Écart	0,0	4,8	0,2	0,2	0,2	0,3	0,1	0,5	9,2	0,174	1,6	2,4
Erreur relative (%)	0,0	22,0	1,8	2,1	2,2	3,4	28,6	37,0	18,8	22	18,0	9,9

4.2.2.3 Température de l'air de -14 °C et de la plaque de -16,1 °C

– Boîte à neige avec de petits trous

Dans cette section, la moyenne, l'écart-type et l'incertitude entre les résultats obtenus pour une température de l'air de -14 °C et de la plaque de -16,1 °C sont calculés et présentés au **Tableau 21**. Deux essais ont été effectués durant la série des essais principaux, et quatre autres durant la série des essais complémentaires. L'intensité moyenne est de $25,1 \pm 0,5$ g/dm²/h, correspondant à une masse de $15,5 \pm 2,4$ g/dm² obtenue après un temps de $36,3 \pm 5,4$ minutes. La température moyenne de l'air est de $-14,3 \pm 0,6$ °C, celle de la plaque durant le régime permanent est de $-15,1 \pm 1,5$ °C, les puissances moyenne et maximum requises sont de $0,36 \pm 0,23$ W/dm² et $1,06 \pm 0,56$ W/dm², avec une concentration finale en propylène glycol de $27,9 \pm 1,3$ % correspondant à une température de solidification finale de $-11,38 \pm 0,98$ °C.

Tableau 21 : Tableau récapitulatif d'essais effectués avec la condition 7

	Intensité de neige		Température							Puissance		Temps Endurance	ISTDN	T-Solidif (°C)	C (%)
	Taux	Masse	Air				Plaque			Fluide					
	g/dm ² /h	g/dm ²	Moy °C	Min °C	Per °C	Max °C	Min °C	Per °C	Max °C	Moy W/dm ²	Max W/dm ²	min			
065	24,8	14,8	-15,1	-13,3	-12,9	-12,6	-	-	-	0,40	0,90	35,0	0,534	-11,64	28,3
039	25,6	15,5	-14,9	-15,4	-14,7	-12,7	-	-	-	0,10	0,50	32,8	0,559	-11,30	27,8
095	25,4	14,0	-13,8	-16,5	-15,6	-13,7	-15,7	-15,2	-13,4	0,37	1,07	33,2	0,507	-12,05	28,8
096	25,3	18,8	-14,0	-16,4	-15,6	-14,1	-15,3	-15,0	-13,6	0,32	1,05	43,5	0,676	-10,10	26,2
104	24,6	14,5	-14,0	-16,7	-15,8	-14,4	-15,5	-15,2	-14,0	0,39	1,22	35,5	0,522	-11,80	28,5
105	24,6	15,3	-14,0	-16,6	-15,8	-15,2	-16,1	-15,6	-14,6	0,56	1,62	37,5	0,551	-11,41	28,0
Moyenne	25,1	15,5	-14,3	-15,8	-15,1	-13,8	-15,7	-15,3	-13,9	0,36	1,06	36,3	0,558	-11,38	27,9
Écart type	0,4	1,7	0,6	1,3	1,1	1,0	0,3	0,3	0,5	0,15	0,37	3,9	0,061	0,68	0,9
Incertitude	±0,5	±2,4	±0,6	±1,7	±1,5	±1,3	±0,4	±0,3	±0,6	±0,23	±0,56	±5,4	±0,085	±0,98	±1,3

– **Boîte à neige avec de gros trous**

Deux essais ont été effectués pour la condition 7 afin de confirmer si l'essai est répétitif. Le **Tableau 22** résume les résultats de ces deux essais. Les deux essais sont presque identiques en intensité de précipitations et température de l'air et de la plaque, mais la masse de neige cumulée est différente de 6,64 g/dm², ce qui a un impact sur la puissance maximum et moyenne, de 0,2 et 0,1 W/dm² et sur le temps d'endurance, de 14 minutes 19 secondes. La différence en concentration finale en propylène glycol est de 3,7 % correspondant à une différence de température de solidification finale de 2,48 °C.

Tableau 22 : Résultat pour la condition 7 avec un cylindre à gros trous

	Intensité de neige		Température				Puissance		Temps Endurance	ISTDN	T- Solidif (°C)	C (%)
	Taux	Masse	Air		Plaque		Moy	Max				
	g/dm ² /h	g/dm ²	Moy °C	Min °C	Per °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²	min			
064	25,3	15,88	-15,1	-13,3	-12,9	-12,7	0,3	0,9	34,96	0,571	-11,15	27,6
066	24,8	22,52	-15,1	-13,3	-13,0	-12,8	0,2	0,7	49,28	0,810	-8,67	23,9
Moyenne	25,1	19,20	-15,1	-13,3	-13,0	-12,8	0,3	0,8	42,12	0,691	-9,91	25,8
Écart	0,5	6,64	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,2	14,32	0,239	2,48	3,7
Erreur relative (%)	2,0	34,58	0,0	0,0	0,8	0,8	40,0	25,0	34,00	34,6	25,03	14,4

4.2.2.4 Température de l'air de -25 °C et de la plaque de -27,1 °C

– **Boîte à neige avec de petits trous**

Dans cette section, la moyenne, l'écart-type et l'incertitude entre les résultats obtenus pour une température de l'air de -25 °C et de la plaque de -27,1 °C sont calculés et présentés au **Tableau 23**. Deux essais ont été effectués durant la série des essais principaux, et les quatre autres durant la série des essais complémentaires. L'intensité moyenne est de $24,9 \pm 0,8$ g/dm²/h, correspondant à une masse de $10,2 \pm 2,0$ g/dm² obtenue après un temps

de $22,3 \pm 2,7$ minutes. La température moyenne de l'air est de $-25,0 \pm 0,5$ °C, celle de la plaque durant le régime permanent est de $-24,3 \pm 1,4$ °C, avec une concentration finale en propylène glycol de $31,9 \pm 1,7$ % correspondant à une température de solidification finale de $-14,4 \pm 1,3$ °C.

Tableau 23 : Résultat pour la condition 8 avec un cylindre à petits trous

	Intensité de neige		Température							Puissance		Temps Endurance	ISTDN	T- Solidif (°C)	C (%)
	Taux	Masse	Air	Plaque			Fluide			Moy	Max				
	g/dm ² /h	g/dm ²	Moy °C	Min °C	Per °C	Max °C	Min °C	Per °C	Max °C	Moy W/dm ²	Max W/dm ²	min			
056	24,9	12,6	-25,7	-22,8	-22,6	-22,4	-	-	-	0,0	0,0	25,9	0,453	-12,8	29,9
054	24,9	12,6	-25,6	-22,8	-22,6	-22,4	-	-	-	0,0	0,0	21,7	0,453	-12,8	29,9
098	24,4	9,6	-24,7	-25,1	-25,0	-24,7	-25,0	-24,8	-24,4	0,0	0,0	23,4	0,346	-14,8	32,4
099	24,2	8,6	-24,6	-25,2	-25,0	-24,9	-25,0	-24,8	-24,5	0,0	0,0	21,4	0,310	-15,5	33,2
107	25,7	8,7	-24,6	-25,2	-25,0	-24,7	-25,1	-24,9	-24,4	0,0	0,0	20,5	0,313	-15,4	33,2
108	25,4	8,9	-24,6	-25,5	-25,3	-24,7	-25,3	-25,1	-24,3	0,0	0,0	21,0	0,321	-15,3	33,0
Moyenne	24,9	10,2	-25,0	-24,4	-24,3	-24,0	-25,1	-24,9	-24,4	0,0	0,0	22,3	0,366	-14,4	31,9
Écart type	0,6	1,9	0,5	1,3	1,3	1,2	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	2,0	0,069	1,3	1,6
Incertitude	±0,8	±2,0	±0,5	±1,4	±1,4	±1,3	±0,2	±0,2	±0,1	±0,0	±0,0	±2,7	±0,072	±1,3	±1,7

– Boîte à neige avec de gros trous

Deux essais ont été effectués pour la condition 8 afin de confirmer si l'essai est répétitif. Le **Tableau 24** résume les résultats de ces deux essais. Ces derniers sont presque identiques en intensité de précipitations, de masse de neige cumulée, de température de l'air et de la plaque, de concentration finale en propylène glycol, de température de solidification et de temps d'endurance.

Tableau 24 : Résultat pour la condition 8 avec un cylindre à gros trous

	Intensité de neige		Température				Puissance		Temps Endurance min	ISTDN	T-Solidif (°C)	C (%)
	Taux	Masse	Air	Plaque			Moy	Max				
	g/dm ² /h	g/dm ²	Moy °C	Min °C	Per °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²				
057	25,1	9,17	-25,7	-22,6	-22,5	-22,3	0,0	0,0	20,00	0,330	-15,1	32,7
050	25,8	9,31	-25,7	-22,5	-22,4	-22,3	0,0	0,0	20,26	0,335	-15,0	32,6
Moyenne	25,5	9,24	-25,7	-22,6	-22,5	-22,3	0,0	0,0	20,13	0,333	-15,0	32,7
Écart	0,7	0,14	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,26	0,005	0,1	0,1
Erreur relative (%)	2,8	1,52	0,0	0,4	0,4	0,0	0,0	0,0	1,29	1,5	0,7	0,3

4.2.3 Répétitivité

Les essais effectués sont plus répétitifs en matière d'intensité, avec une erreur relative maximum de 9 % pour la masse de neige accumulée. Ils sont plus répétitifs pour les essais effectués avec une intensité de 10 g/dm²/h avec une erreur relative maximale de 16 % pour les essais effectués à une température de -10 °C, et de 29 % pour ceux réalisés avec une intensité de 25 g/dm²/h à une température de -5 °C. L'erreur relative de la température de l'air entre les essais est maximale pour les essais effectués à une température de -5 °C avec une erreur maximale de 25 %. Les températures de plaque mesurées sont presque égales, à part celles réalisées à une température de -10 °C et -5 °C avec une erreur relative maximale de 15 %. Les puissances consommées sont plus dispersées pour les intensités de 25 g/dm²/h avec une erreur relative maximale de 29 % pour une température de -10 °C. L'erreur relative du temps d'endurance est maximale pour les essais réalisés à une intensité de 25 g/dm²/h pour la température de -14 °C avec une valeur maximale de 39 %. En général, les essais effectués à une intensité de 10 g/dm²/h sont plus répétitifs que ceux réalisés à une

intensité de 25 g/dm²/h. L'erreur relative est plus significative pour les essais réalisés avec une température de -5 °C et de -14 °C.

4.3 Analyse des résultats

Cette section présente l'interprétation des résultats obtenus lors des essais pour les quatre températures et les deux intensités réalisés avec un cylindre à petits trous et à gros trous. Les résultats analysés sont l'intensité de neige, la masse accumulée, l'épaisseur finale de neige, la concentration volumique finale en propylène glycol dans le fluide, la puissance fournie, l'énergie fournie, la température initiale de la plaque, la température de solidification finale du fluide et le temps d'endurance.

Dans la légende des graphiques, la désignation SH (Small Hole) correspond aux essais réalisés avec un cylindre à petits trous et BH (Big Hole), à ceux réalisés avec un cylindre à gros trous.

4.3.1 Intensité moyenne de neige durant les essais

La **Figure 75** présente les valeurs d'intensité moyenne mesurées durant les essais réalisés avec un cylindre à petits trous et à gros trous en fonction de la température de l'air mesurée.

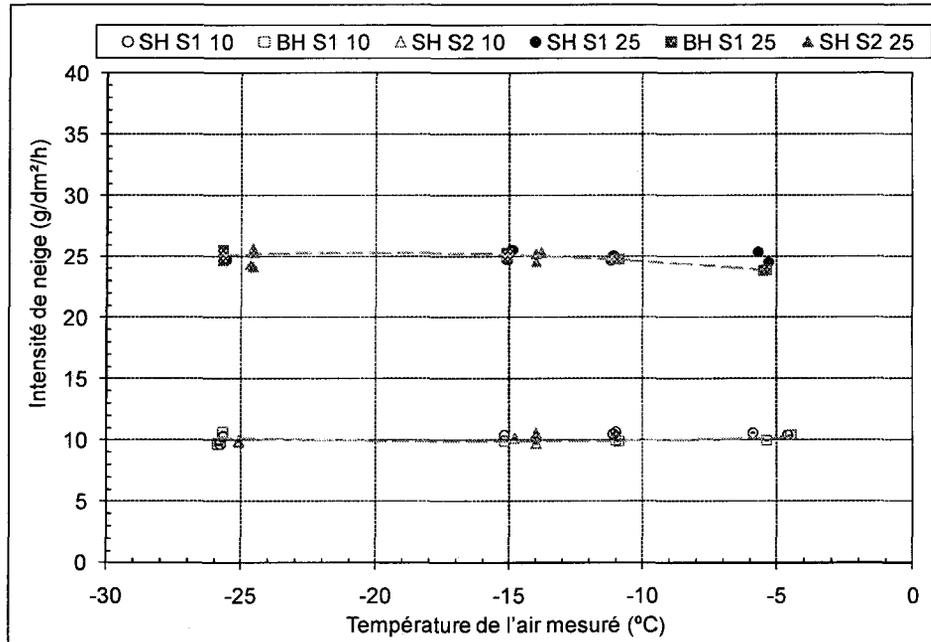


Figure 75 : Intensité moyenne enregistrée durant les essais

L'intensité enregistrée durant les essais effectués pour les différentes températures est presque égale aux valeurs d'intensité désirée de 10 et 25 g/dm²/h. Pour une intensité de 10 g/dm²/h, la variation est de $\pm 0,5$ g/dm²/h, et pour une intensité de 25 g/dm²/h, elle est de ± 1 g/dm²/h.

4.3.2 Évaluation du fluide

4.3.2.1 Masse de neige accumulée

La Figure 76 et la Figure 77 illustrent la quantité de neige qui tombe sur le fluide durant les essais et qui est nécessaire pour atteindre l'échec pour des intensités de 10 et 25 g/dm²/h respectivement, pour les différentes conditions de température en fonction du temps. La Figure 78 présente la masse de neige accumulée jusqu'à l'échec en fonction de la température de l'air mesurée pour les différentes conditions de température et d'intensité.

La **Figure 76** montre que la masse de neige accumulée augmente d'une façon linéaire avec le temps. Pour les essais réalisés avec une intensité de $10 \text{ g/dm}^2/\text{h}$, la variation des données est plus importante pour une température de $-5 \text{ }^\circ\text{C}$, soit $\pm 9 \text{ g/dm}^2$, et elle est de $\pm 1 \text{ g/dm}^2$ pour une température de $-25 \text{ }^\circ\text{C}$ (**Figure 76**), elle augmente avec la température. Pour le temps d'endurance des essais (**Figure 76**), la variation est de la même façon que la masse accumulée, il est plus important pour les essais réalisés à une température de $-5 \text{ }^\circ\text{C}$, soit de 47 minutes, et il est de deux minutes pour ceux réalisés à une température de $-25 \text{ }^\circ\text{C}$.

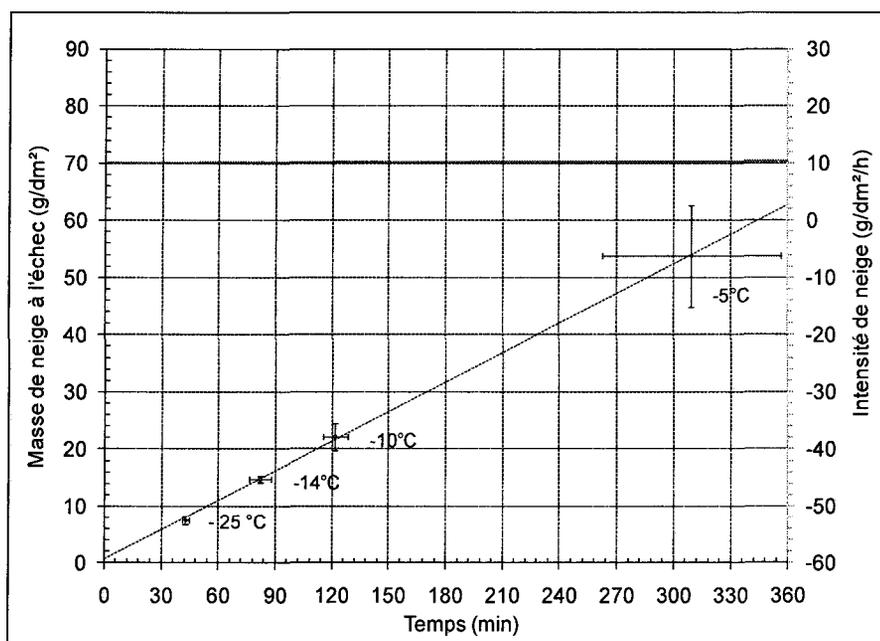


Figure 76 : Masse de neige accumulée dans le fluide en fonction du temps pour les essais à $10 \text{ g/dm}^2/\text{h}$

Pour les essais réalisés avec une intensité de $25 \text{ g/dm}^2/\text{h}$ (**Figure 77**), la masse varie de la même façon que pour ceux réalisés avec une intensité de $10 \text{ g/dm}^2/\text{h}$, la variation est importante pour une température de $-5 \text{ }^\circ\text{C}$, soit $\pm 11 \text{ g/dm}^2$, et elle est nulle pour une température de $-25 \text{ }^\circ\text{C}$. Pour le temps d'endurance des essais il augmente avec la

température (**Figure 77**), la variation est plus important pour les essais réalisés à une température de -5 °C , soit de 28 minutes, et il est de une minute pour les essais réalisés avec une température de -25 °C .

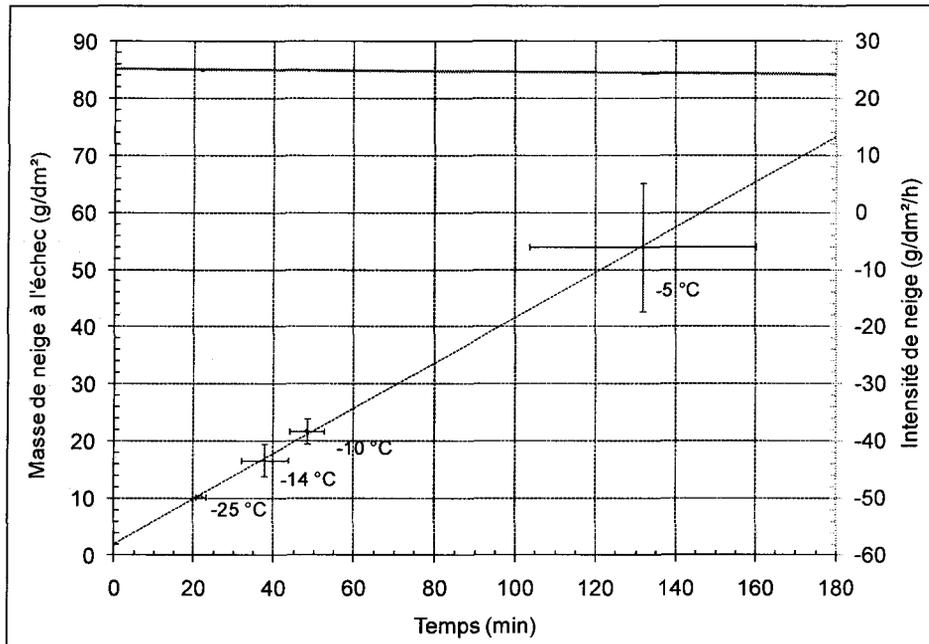


Figure 77 : Masse de neige accumulée dans le fluide en fonction du temps pour les essais à $25\text{ g/dm}^2/\text{h}$

La masse de neige mesuré à l'échec du fluide diminue exponentiellement avec la température de l'air et de la plaque (**Figure 78**), mais elle est constante avec la grosseur des trous et peu dépendante de l'intensité. Pour les essais effectués avec une température de l'air de -5 °C , la masse moyenne de neige accumulée est de 54 g/dm^2 pour les deux intensités, et elle est de 9 g/dm^2 pour une température de -25 °C .

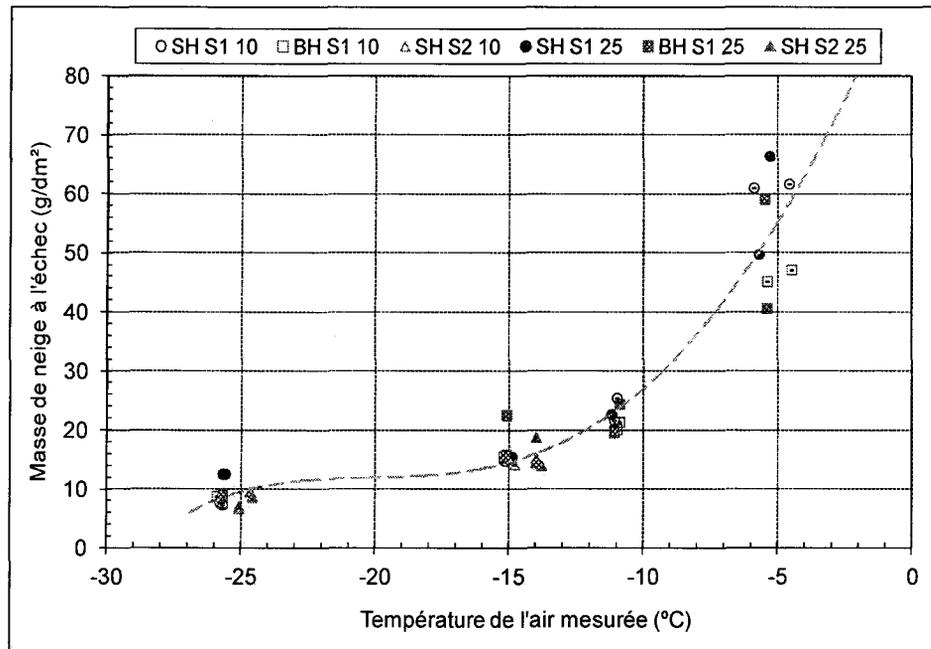


Figure 78 : Masse de neige accumulée en fonction de la température de l'air mesurée

4.3.2.2 Épaisseur finale de neige accumulée

La Figure 79 présente l'épaisseur finale du fluide en assumant que toute la neige accumulée se transforme en eau pour les différents essais réalisés à différentes conditions de température et d'intensité en fonction de la température de l'air mesurée.

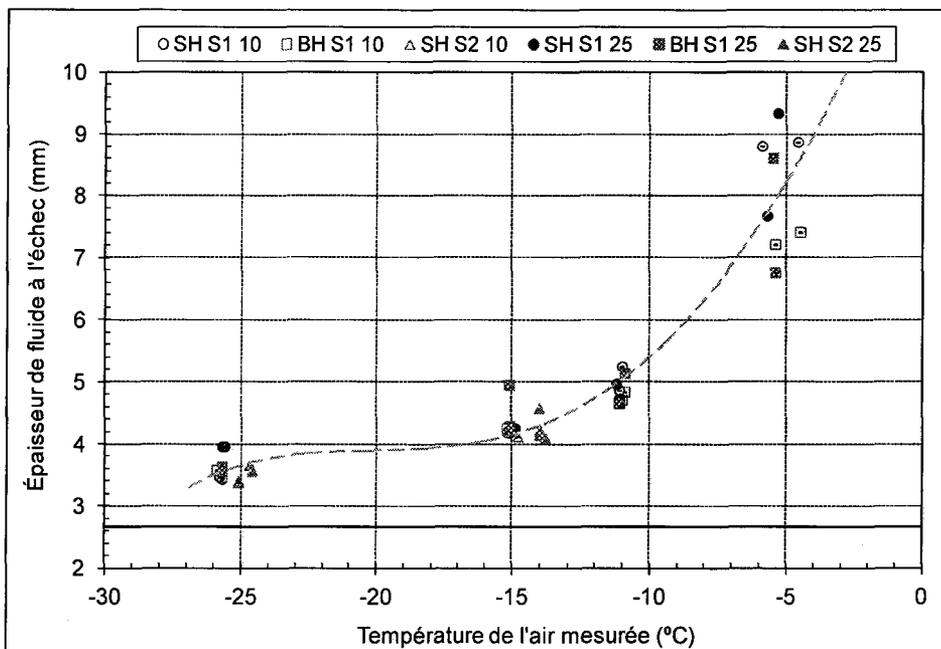


Figure 79 : Épaisseur finale de neige qui tombe sur le fluide

L'épaisseur initiale de fluide est de 2,7 mm, elle augmente avec la masse de neige qui tombe. L'épaisseur de neige qui tombe sur le fluide diminue exponentiellement avec la diminution de la température. L'épaisseur de neige accumulée est indépendante de l'intensité et de la grosseur des trous. Pour une température de -5 °C l'épaisseur est de $8,1 \pm 0,9\text{ mm}$, et elle est de $3,6 \pm 0,2\text{ mm}$ pour une température de -25 °C . Cette figure permet de réaliser que l'accumulation de neige est très importante, elle représente à -25 °C , 33 % de l'épaisseur initiale du fluide, et à -5 °C , 200 % de son épaisseur initiale.

4.3.2.3 Concentration volumique finale en propylène glycol

La **Figure 80** présente la concentration volumique finale en propylène glycol dans le fluide qui est calculée à partir de la masse de neige accumulée dans le fluide en considérant que toute la neige se transforme en eau et se diffuse instantanément dans le fluide, pour les différents essais réalisés à différentes intensités en fonction de la température de l'air mesurée.

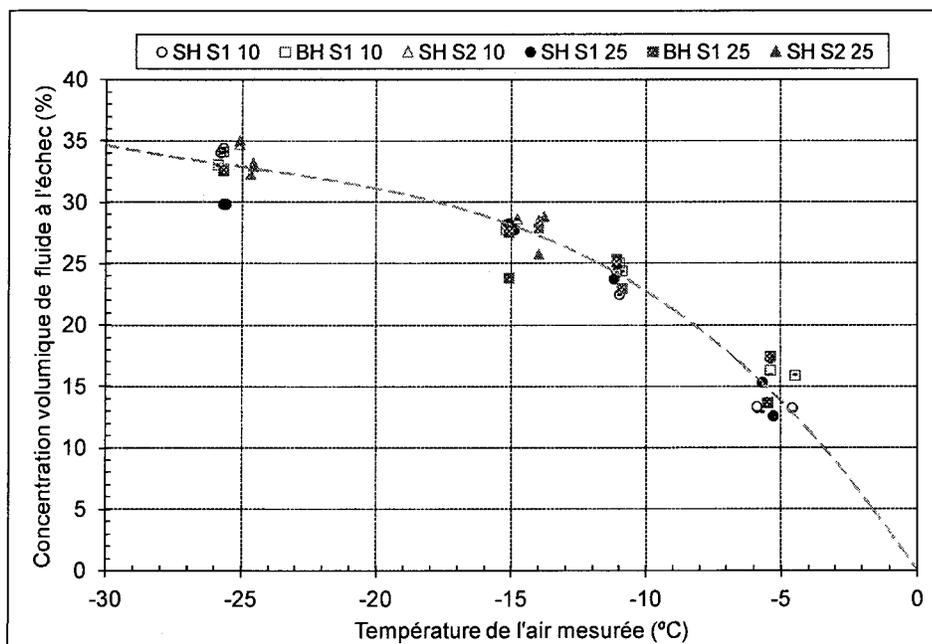


Figure 80 : Concentration finale en propylène glycol dans le fluide

La concentration moyenne volumique en propylène glycol dans le fluide débute à une valeur de 44 %, et diminue exponentiellement avec l'augmentation de la température. L'intensité et la grosseur des trous ont peu d'effet sur la concentration. La concentration en propylène glycol est liée à la masse de neige qui tombe. Pour une température de -25 °C, elle est d'environ 33 %, et de 15 % pour une température de -5 °C.

Par contre, la diffusion de l'eau dans le fluide ne devrait pas être instantanée et la concentration en propylène glycol ne devrait pas être homogène dans le fluide. Donc, la concentration en propylène glycol devrait diminuer de la plaque vers la surface libre. Les observations montrent que seulement une fraction de la neige fond et se diffuse dans le fluide, l'autre fraction s'accumule dans le fluide jusqu'à l'échec. Donc, le gradient de la concentration en propylène glycol lors de l'échec est difficilement évaluable sans la connaissance de cette fraction et de la vitesse de diffusion de l'eau dans le propylène glycol.

4.3.3 Puissance et énergie moyennes fournies durant l'essai

La **Figure 81** résume les puissances moyennes fournies à la plaque durant les essais réalisés, et la **Figure 82** présente les énergies moyennes fournies à la plaque, pour les différentes conditions de température et d'intensité en fonction de la température de l'air mesurée.

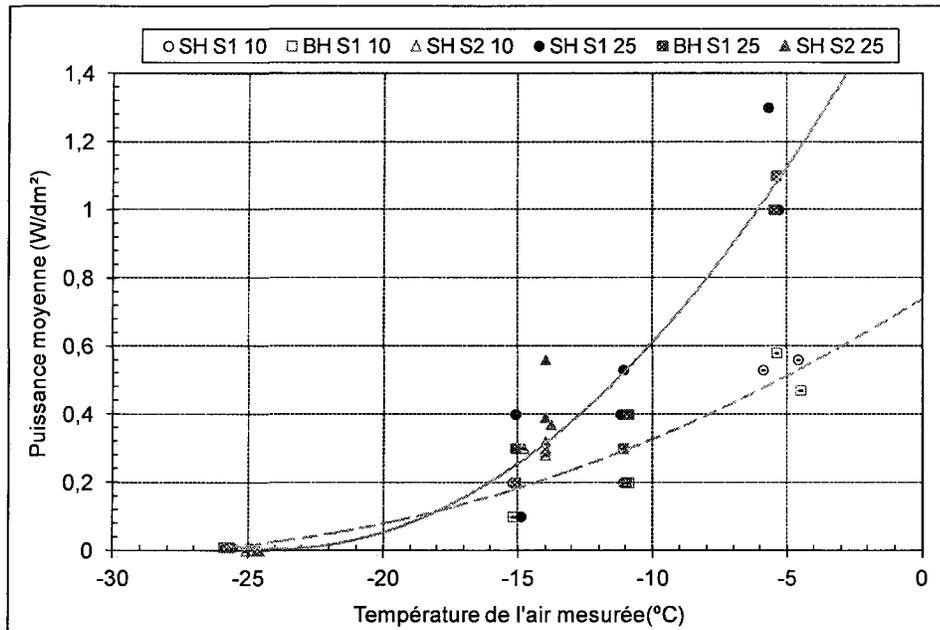


Figure 81 : Puissance moyenne fournie à la plaque

La puissance moyenne diminue exponentiellement avec la température, de $1,1 \pm 0,14$ W/dm² à -5 °C pour atteindre 0 à -25 °C. Elle est indépendante de la grosseur des trous du cylindre, mais dépendante de l'intensité des précipitations, car plus de puissance doit être fournie pour les précipitations à forte intensité, en raison de la plus grande quantité de neige qui doit être absorbée par le fluide sur la même période de temps. Par contre, pour une même température, la même quantité d'énergie est consommée (**Figure 82**). À une température de -5 °C, la valeur de la puissance moyenne pour une intensité de 25 g/dm²/h est de $1,1 \pm 0,14$ W/dm², et de $0,54 \pm 0,05$ W/dm² pour une intensité de 10 g/dm²/h.

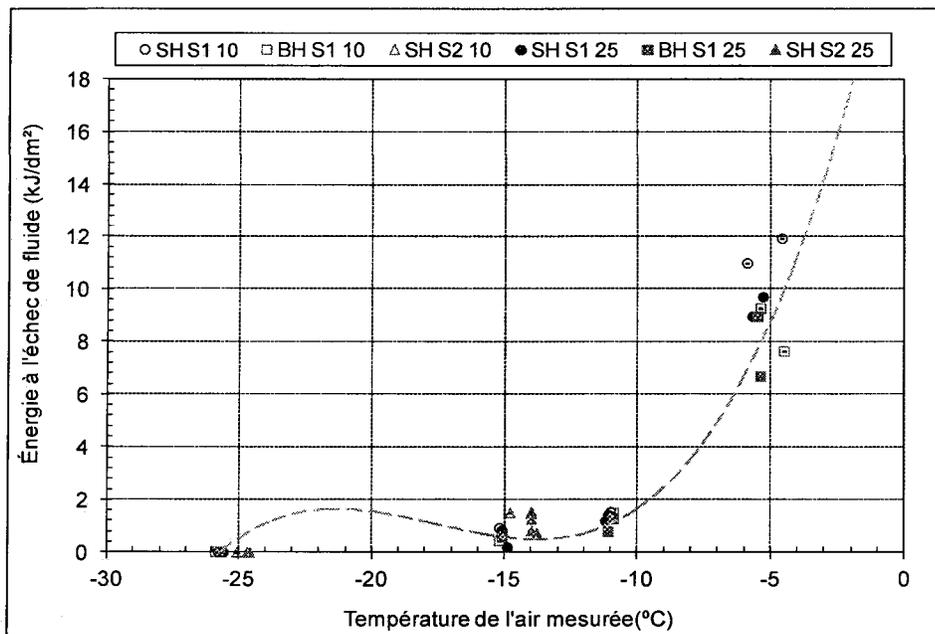


Figure 82 : Énergie moyenne fournie à la plaque

L'énergie moyenne fournie à la plaque par le système de chauffage décroît exponentiellement avec la température; il passe de $9,3 \pm 1,7$ kJ/dm² pour une température de -5 °C à zéro pour une température de -25 °C. Les valeurs d'énergie sont plus dispersées pour les essais réalisés à -5 °C, de $11,5 \pm 0,7$ kJ/dm² pour les essais effectués avec un cylindre à petits trous, et de $8,5 \pm 1,2$ kJ/dm² pour ceux effectués avec un cylindre à gros trous.

4.3.4 Température de solidification finale du fluide

La Figure 83 présente les températures de solidification du fluide calculées à partir de la concentration volumique en propylène glycol en assumant que toute la neige accumulée se transforme en eau et se diffuse instantanément dans le fluide en fonction de la température

de l'air mesurée durant chaque essai réalisé pour les différentes conditions de température et d'intensité.

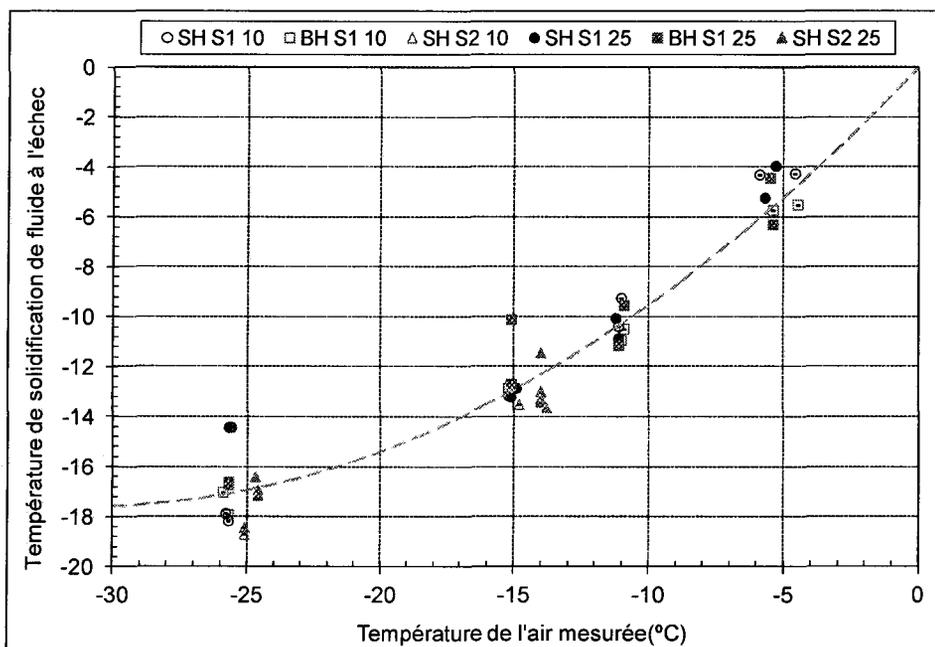


Figure 83 : Température de solidification finale du fluide

La température de solidification finale du fluide dépend de la concentration volumique en propylène glycol dans le fluide. Avec une concentration initiale en propylène glycol qui est de 0,44 la température de solidification du fluide est de $-25,7\text{ °C}$; elle augmente avec l'augmentation de la température de l'air de façon exponentielle. La masse de neige conduisant à l'échec augmente avec la température, accroissant la quantité d'eau dans le fluide, ce qui dilue celui-ci; cela entraîne une diminution de la concentration en propylène glycol et une augmentation de la température de solidification du fluide. Pour un essai effectué à une température de -5 °C la température de solidification finale du fluide est de -5 °C et de -17 °C pour une température de -25 °C .

4.3.5 Temps d'endurance pour chaque essai

La **Figure 84** présente les temps d'endurance pour les essais réalisés avec différentes conditions de température et d'intensité en fonction de la température de l'air mesurée.

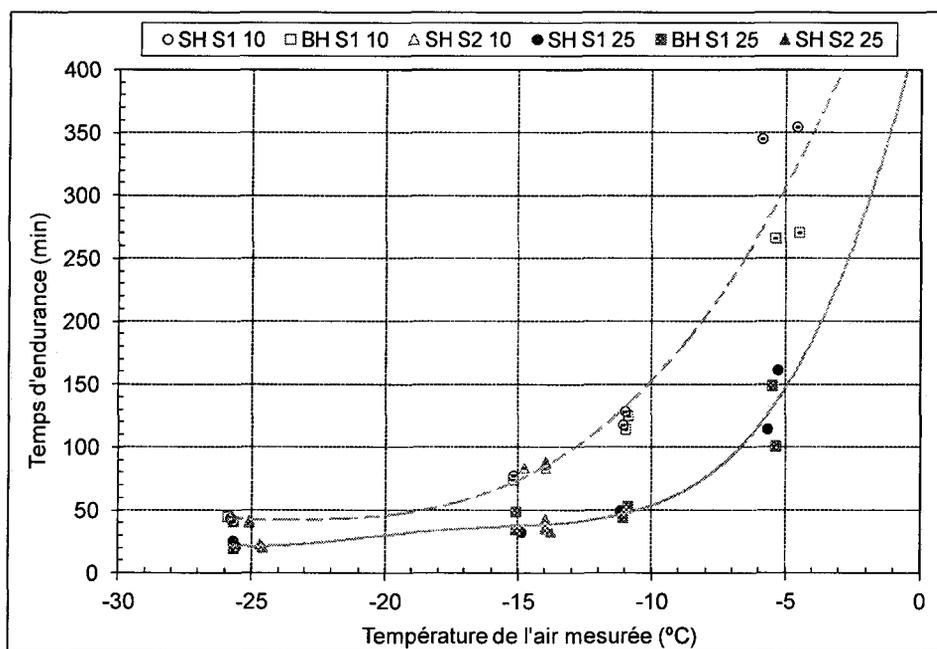


Figure 84 : Temps d'endurance pour les différents essais

Le temps d'endurance du fluide diminue exponentiellement avec la température. Il est indépendant de la grosseur des trous, mais dépendant de l'intensité des précipitations. Pour une intensité de 25 g/dm²/h, le temps d'endurance est plus court que celui de 10 g/dm²/h.

4.3.6 Le nombre adimensionnel ISTDN

La **Figure 85** présente les nombres adimensionnels pour les essais réalisés avec différentes conditions de température et d'intensité en fonction de la température de l'air mesurée.

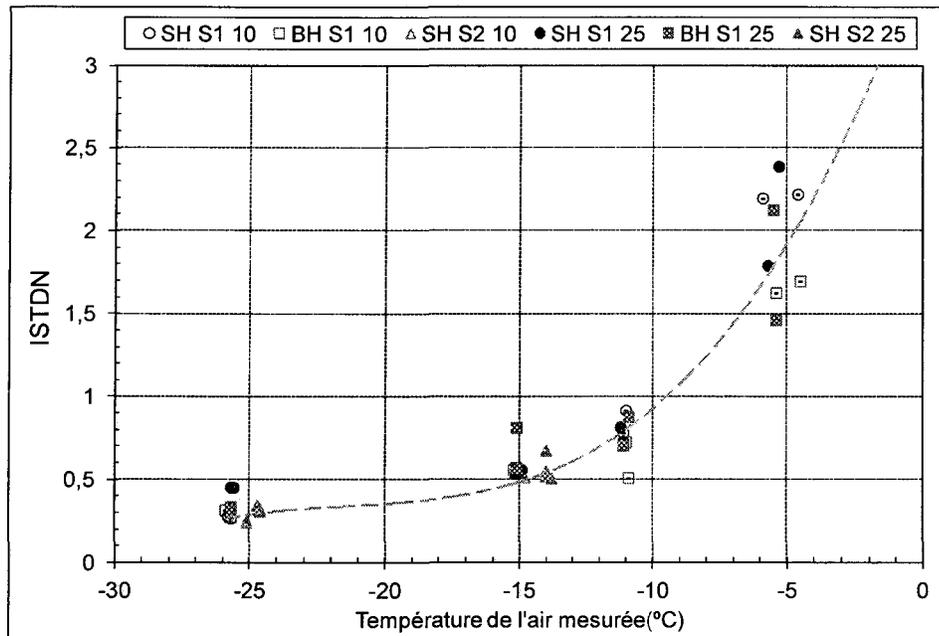


Figure 85 : Nombre adimensionnel ISTDN pour les différents essais

Le nombre adimensionnel ISTDN diminue exponentiellement avec la diminution de la température de l'air et de la plaque (**Figure 85**), il est indépendant de l'intensité et de la grosseur des trous.

CHAPITRE V
DESCRIPTION DU PROCESSUS

CHAPITRE V

DESCRIPTION DU PROCESSUS

5.1 Explication du phénomène

Une fraction de la neige qui tombe sur le fluide antigivre qui recouvre la plaque d'aluminium fond durant l'essai, diluant ainsi le fluide à base de propylène glycol. Pour fondre, la neige, qui est dans un état stable, a besoin d'énergie; celle-ci, appelée chaleur latente de fusion, est retirée du fluide, ce qui abaisse sa température. Comme le fluide est en contact avec la plaque, lorsque la température du fluide est inférieure à celle de la plaque, le fluide par diffusion thermique va aller chercher l'énergie contenue dans la plaque pour compenser sa baisse de température. Cet échange diminue la température de la plaque qui est compensée par le système de chauffage lequel cherche à maintenir la température de la plaque à la température désirée.

À une température donnée, comme la masse de neige accumulée à l'échec est constante indépendamment de l'intensité des précipitations, il est logique de penser que le fluide est seulement en mesure d'absorber une quantité précise de neige. De plus, comme l'énergie consommée est constante, indépendamment de l'intensité des précipitations, il est logique de penser, en supposant que l'énergie consommée est utilisée uniquement pour fondre la neige, que la même quantité d'eau se dilue dans le fluide indépendamment de l'intensité des précipitations.

Donc, à une température donnée, indépendamment de l'intensité des précipitations, le fluide échoue parce que la concentration en propylène glycol en surface du fluide a atteint une concentration critique. En résumé, la concentration de propylène glycol débute à 44 %, l'eau provenant de la fonte de la neige se diffuse dans les 400 ml de fluide, et le dilue, ce qui engendre une diminution de sa concentration avec le temps, pour atteindre une valeur critique qui dépend de la température à laquelle l'essai a été réalisé.

Au début des essais effectués à une température supérieure à -25 °C , le système est en transition, car la puissance fournie pour compenser la baisse de température du fluide augmente à une valeur maximale, décroît et se maintient à une valeur constante pendant un intervalle de temps plus ou moins long dépendamment de l'intensité et de la température de l'air. Par la suite, la puissance décroît vers une valeur nulle. En supposant que lorsque le régime établi est atteint, le fluide est à l'équilibre thermique et la majorité de l'énergie fournie par le système de chauffage est utilisée pour faire fondre la neige, il est possible d'estimer, à partir de l'énergie fournie, la fraction de neige qui fond et qui est appelée fraction liquide.

Pour les essais effectués à une température de -25 °C , comme aucune énergie n'est impliquée, la neige ne fond pas, mais s'accumule dans le fluide n'impliquant aucune dilution du fluide. La neige qui tombe à la surface du fluide descend dans celui-ci par gravité jusque sur la surface de la plaque. La neige s'accumule par gravité dans le fluide et finit par former une slush. Lorsque le fluide est saturé de neige, résultant une slush homogène, la neige s'accumule à la surface du fluide. Lorsqu'elle recouvre 30 % de sa surface, le fluide échoue.

Les photos présentées aux **Figure 86**, **Figure 87** et **Figure 88** montrent la forme que prend la neige précipitée durant un essai réalisé à une température de l'air de -15 °C pour une intensité de $10\text{ g/dm}^2/\text{h}$. Elles sont prises au cours de l'essai et il est clair que la neige qui tombe ne fond pas en totalité dans le fluide et que la quantité non fondue forme une slush.

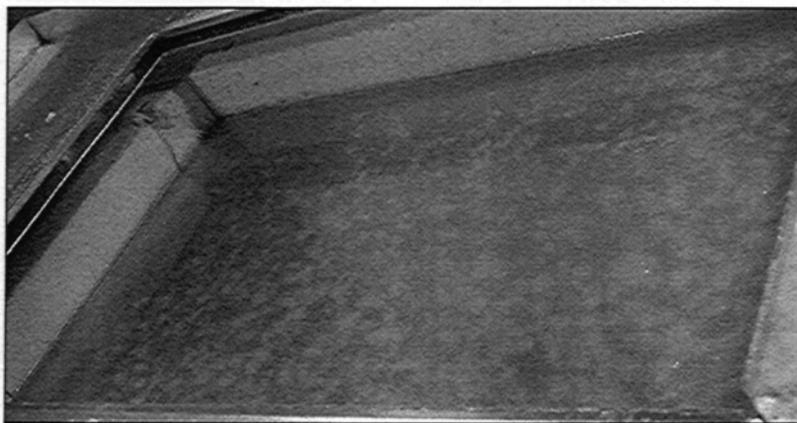


Figure 86 : Aspect que prend la neige précipitée sur le fluide (slush) après 23 minutes

Le fluide en cours d'essai est composé du fluide initial, d'eau due à la fonte de la neige et de neige non fondue, comme le montrent la **Figure 86** et la **Figure 87**.

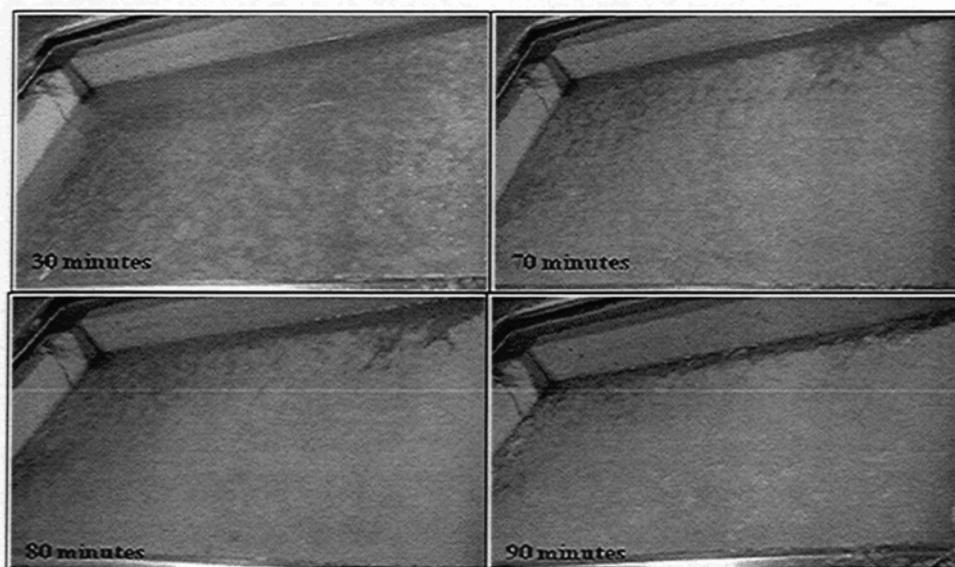


Figure 87 : Aspect que prend la neige précipitée sur le fluide

À l'échec (**Figure 88**), la surface du fluide ou de slush est recouverte de 30 % de neige.

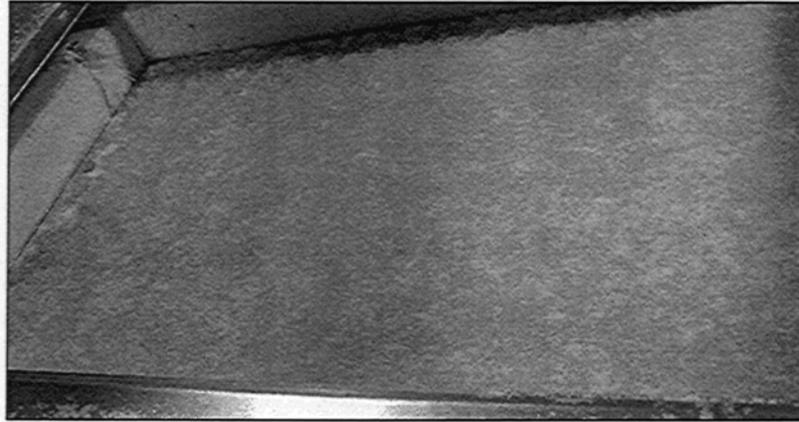


Figure 88 : Aspect que prend la neige précipitée à l'échec du fluide après 97 minutes

5.2 Fraction liquide

La fraction liquide représente la partie de la masse de neige en contact avec le fluide qui fond; elle est comprise entre zéro et un. Elle est le résultat de l'énergie fournie par le système de chauffage à la plaque qui est utilisée pour fondre la neige et de l'énergie contenue dans la neige :

$$f = \frac{E_{fournie}}{E_{snow}} \quad \text{Équation 8}$$

Le remplacement de $E_{fournie}$ par sa valeur qui est la puissance fournie multipliée par la durée de l'essai (temps d'endurance) et de E_{snow} par sa valeur qui est la masse de neige précipitée durant l'essai multipliée par la chaleur latente de fusion de la neige donne l'équation suivante :

$$f = \frac{P_{fournie} t}{m_{snow} L_f} \quad \text{Équation 9}$$

La **Figure 89** présente la fraction liquide en fonction de la température de l'air mesurée, pour les différents essais réalisés à différentes conditions de température et d'intensité.

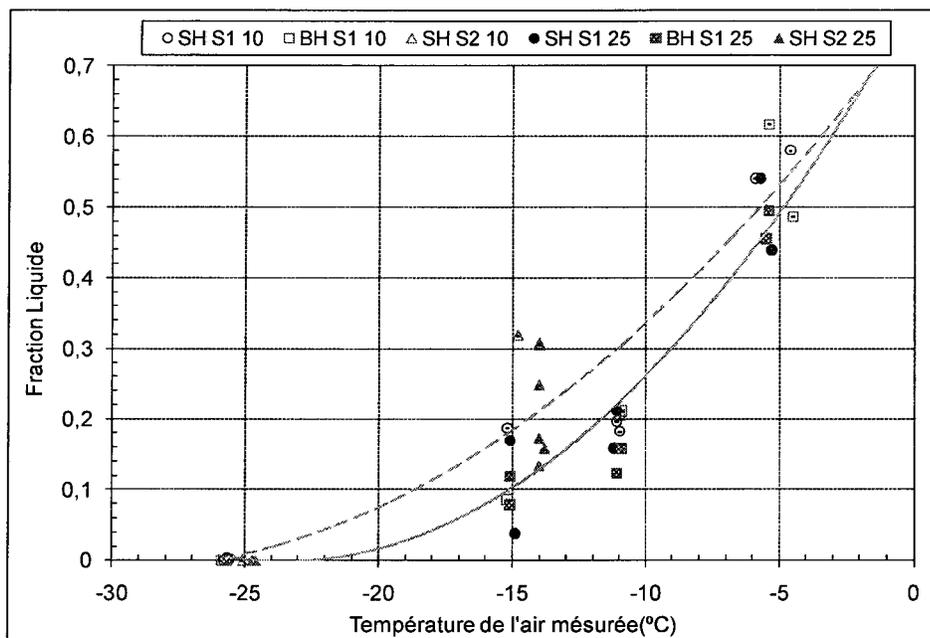


Figure 89 : Fraction liquide en fonction de la température de l'air mesurée

La fraction liquide diminue exponentiellement avec la diminution de la température de l'air. Pour les essais effectués à une température de l'air de -5 °C , la valeur moyenne de la fraction liquide est de $0,56 \pm 0,01$ pour une intensité de $10\text{ g/dm}^2/\text{h}$, et de $0,48 \pm 0,01$ pour une intensité de $25\text{ g/dm}^2/\text{h}$. Elle est nulle pour les essais effectués à une température de -25 °C .

5.3 La diffusivité

La diffusion de l'eau dans le propylène glycol n'est pas instantanée, elle est de l'ordre de $3 \times 10^{-11}\text{ m}^2/\text{s}$ pour une température de -5 °C , et de l'ordre de $3 \times 10^{-12}\text{ m}^2/\text{s}$ pour une température de -25 °C (Annexe C). En raison de ce taux de diffusion, il est logique de

penser que si la neige qui entre en contact avec la surface du fluide fond seulement en surface, un gradient de concentration en propylène glycol existe sur l'épaisseur de la couche du fluide. Par contre, si la neige est répartie uniformément sur l'épaisseur du fluide et sur sa surface, il en résulte une densité de neige dans le fluide suffisante pour que les multiples sites de fonte permettent une dilution homogène dans le fluide s'apparentant à une diffusion instantanée de l'eau. Il est possible de supposer que si la dilution du fluide est homogène, il en résulte une concentration homogène en propylène glycol. Cette hypothèse est primordiale et simplifie grandement la compréhension du phénomène conduisant à l'échec du fluide sous précipitations de neige.

En connaissant la fraction de neige qui se transforme en eau, il est possible de calculer la concentration en propylène glycol du fluide au moment de son échec et la température de solidification du fluide.

La concentration est calculée avec l'**Équation 5** en remplaçant la masse de neige qui tombe par la valeur de neige qui se transforme en eau en tenant compte de la fraction liquide. Avec les nouvelles valeurs obtenues pour la concentration, la température de solidification du fluide peut être calculée.

La **Figure 90** présente la concentration volumique finale en propylène glycol dans le fluide. Elle est calculée à partir de la masse de neige qui fond dans le fluide en considérant que seulement une fraction de la neige précipitée se transforme en eau et se diffuse instantanément dans le fluide, pour les différents essais réalisés à différentes intensités en fonction de la température de l'air mesurée.

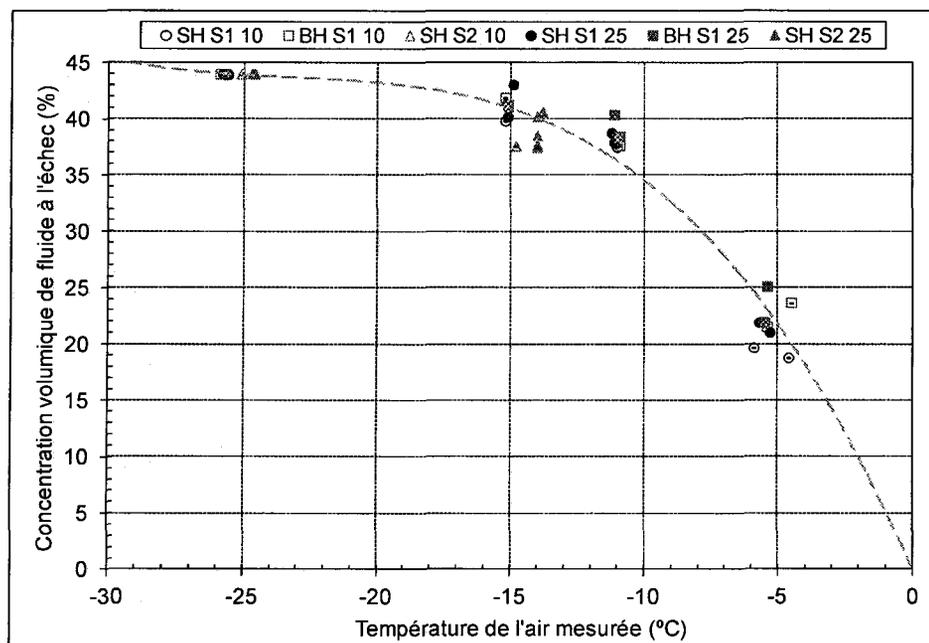


Figure 90 : Concentration finale en propylène glycol en tenant compte de la fraction liquide

La concentration moyenne volumique en propylène glycol dans le fluide débute à une valeur de 44 %, et diminue avec l'augmentation de la température. La concentration en propylène glycol est liée à la masse de neige qui fond dans le fluide. Pour une température de -25 °C, elle est de 44 %, et de 21 % pour une température de -5 °C.

La **Figure 91** présente les températures de solidification du fluide calculées à partir de la concentration volumique en propylène glycol en considérant la partie liquide et solide, mais en excluant le 30 % de neige blanche accumulée en surface, en fonction de la température de l'air mesurée durant chaque essai réalisé pour les différentes conditions de température et d'intensité.

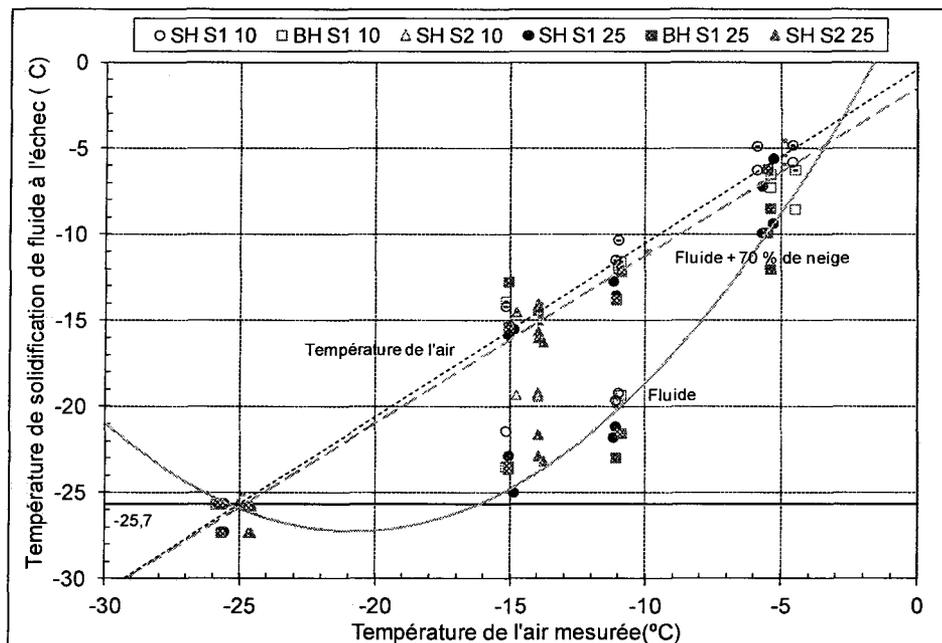


Figure 91 : Température de solidification finale du fluide en tenant compte de la fraction liquide

La température de solidification finale du fluide dépend de la concentration volumique en propylène glycol dans le fluide. Avec une concentration initiale en propylène glycol qui est de 0,44 la température de solidification du fluide est de $-25,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Elle augmente avec la hausse de la température de l'air de façon exponentielle. Pour un essai effectué à une température de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, la température de solidification finale du fluide est de $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, de $-20,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour une température de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, de $-21,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour une température de $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ et de $-25,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour une température de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lorsque les parties liquide et solide de neige sont prises en considération dans le calcul de la concentration, et sans le 30 % de neige qui recouvre la surface du fluide à l'échec (Équation 10), la température de solidification est presque égale à la température du fluide.

$$C_{\text{glycol}} = \frac{\frac{M_{\text{glycol}}}{\rho_{\text{glycol}}}}{\frac{M_{\text{glycol}}}{\rho_{\text{glycol}}} + \frac{M_{\text{eau}}}{\rho_{\text{eau}}} + (100\% - 30\%) \frac{M_{\text{neige}}}{\rho_{\text{neige}}}}$$

Équation 10

CHAPITRE VI

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

CHAPITRE VI

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1 Conclusions

L'utilisation des fluides dégivrants et antigivre, caractérisés par leur temps d'endurance, pour éliminer et prévenir la formation de glace dans le domaine de l'aviation demeure le moyen le plus sécuritaire au sol. Le temps d'endurance des fluides est mesuré en chambre climatique au moyen d'un essai normalisé mené par un opérateur. L'utilisation d'un opérateur pour décider de l'échec du fluide découle d'un manque de connaissance des phénomènes impliqués dans l'échec des fluides. Cette étude a été réalisée dans le but de combler ce manque et de déterminer les paramètres qui participent à l'échec d'un fluide antigivre durant l'essai d'endurance à la neige.

Au cours de ce travail de recherche, la procédure expérimentale utilisée pour évaluer les fluides antigivre selon la norme ARP5485 a été modifiée, et le fluide utilisé durant les différents essais réalisés en laboratoire est un fluide de composition simplifié à base de propylène glycol et d'eau.

À partir des observations et des résultats obtenus lors des essais d'endurance réalisés sous précipitations de neige dans les laboratoires du LIMA, pour deux intensités de neige et quatre températures de l'air, il est possible de tirer les conclusions suivantes :

1. La masse de neige accumulée durant l'essai augmente d'une façon linéaire avec le temps, et diminue exponentiellement avec la température de l'air et de la plaque, mais

- elle est indépendante de la grosseur des trous et peu dépendante de l'intensité des précipitations.
2. La puissance moyenne diminue exponentiellement avec la température. Elle est indépendante de la grosseur des trous du cylindre, mais dépendante de l'intensité des précipitations.
 3. Le temps d'endurance du fluide diminue exponentiellement avec la température. Il est indépendant de la grosseur des trous, mais dépendant de l'intensité des précipitations.
 4. L'énergie moyenne fournie à la plaque par le système de chauffage décroît exponentiellement avec la température, mais elle est indépendante de la grosseur des trous et peu dépendante de l'intensité des précipitations.
 5. Seulement une fraction de la neige fond et se diffuse dans le fluide, la neige non fondue s'accumule de façon homogène dans le fluide pour former une slush qui s'épaissit avec le temps. La fraction liquide qui correspond à la capacité du fluide d'absorber de l'eau, diminue exponentiellement avec la diminution de la température. L'eau diluée dans le fluide augmente la quantité de neige nécessaire pour atteindre la saturation.
 6. La diffusion de l'eau dans le fluide est homogène et s'effectue presque instantanément dans le fluide en raison de nombreux sites de diffusion qui sont présents dans le fluide.
 7. La concentration volumique en propylène glycol dans le fluide, calculée en assumant une diffusion instantanée et homogène dans l'eau, est liée à la quantité de neige

accumulée dans le fluide transformée en eau. Elle diminue avec l'augmentation de la température de l'air. L'intensité et la grosseur des trous ont peu d'effet sur la concentration finale.

8. La température de solidification finale du fluide dépend de la concentration volumique en propylène glycol dans le fluide. Elle augmente avec la hausse de la température de l'air de façon exponentielle. Elle est presque égale à la température du fluide lorsque la neige commence à s'accumuler en surface.
9. Pour les essais effectués à une température supérieure à -25 °C , la diminution de la température de la plaque est compensée par une augmentation de puissance, puis la puissance décroît au cours de l'essai vers une valeur nulle; le fluide absorbe une quantité d'eau fixe, selon la fraction d'énergie consommée, qui dépend de la température de l'air. Pour ceux réalisés à une température de -25 °C , la température de la plaque reste presque constante pendant l'essai et aucune puissance n'est impliquée.

Les résultats issus de cette recherche ont largement éclairé certains aspects reliés à la compréhension du mécanisme qui conduit à l'échec. Les conclusions font ressortir que le mécanisme d'échec n'est pas dominé par le transfert de chaleur (fonte de la neige) et de masse (diffusion de l'eau), mais qu'il est dominé par la capacité du fluide à absorber de l'eau, et que cette capacité dépend de la température du fluide.

6.2 Recommandations

Les principales recommandations découlant de l'étude, et qui pourraient être utiles afin de produire un modèle numérique pour prédire l'échec de fluide, sont :

- Réaliser les mêmes essais avec les fluides dégivrants (type I) et antigivre (types II, III et IV) utilisés dans l'aviation et comparer les résultats avec ceux du fluide générique.
- Réaliser des essais avec une plaque plane inclinée à 10° . Vérifier si les mêmes paramètres sont impliqués dans cet essai et vérifier l'effet de la viscosité du fluide.

BIBLIOGRAPHIE

1. Bragg, M.B., Hutchison, T., Merret, J., Oltman, R., et Pokhariyal, D., (2000), "*Effect of Ice Accretion on Aircraft Flight Dynamics*", in 38th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, janvier 2000.
2. Barry B. Myers, (2001), "*Aircraft Anti-Icing Fluid Endurance, Holdover, and Failure Times under Winter Precipitation Conditions, A Glossary of Terms*", Transportation Development Centre, Transport Canada.
3. Fortin, G., (2003), "*Simulation de l'accrétion de glace sur un obstacle bidimensionnel par la méthode des bissectrices et par la modélisation des ruisselets et des gouttes de surface*", thèse 2003, Université du Québec à Chicoutimi.
4. Mazin, I.P., et al., (2001), "*Thermodynamics of icing cylinder for measurements of liquid water content in supercooled clouds*", Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 18, No. 4, pp. 543-558.
5. Lozowski, E.P., J. R. Stallabrass, et P. F. Hearty., (1983), "*The icing of an unheated, nonrotating cylinder. Part II: icing wind tunnel experiment*", Journal of Applied Meteorology.
6. Pujoul O., (2007), "*Étude microphysique des nuages et des précipitations par radar polarimétrique et simulation numérique influence du milieu de propagation sur la mesure de la réflectivité*", thèse 2007, Université de Toulouse.
7. John V. Cortinas Jr., Ben C. Bernstein, et al., (2004), "*An Analysis of Freezing Rain, Freezing Drizzle, and Ice Pellets across the United States and Canada*", avril 2004.
8. Roberts E., Stewart R.E., (2008), "*On the occurrence of freezing rain and ice pellets over the eastern Canadian Arctic*", Journal of Atmospheric Research, vol. 89, No. 1-2, pp 93-109.
9. Fortin, G., (2009), "*Thermodynamique de la glace atmosphérique*". Notes de cours, Université du Québec à Chicoutimi.

10. Petrenko, V.F., et al., (2003), "*Pulse Electrothermal Deicing*", Proceedings of The Thirteenth (2003), International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, Hawaii, USA, 25-30 mai 2003.
11. Al-Khalil K., "*Thermo-Mechanical Expulsion Deicing System – TMEDS*", Cox and Company, Inc., New York, NY, 10014.
12. Lankford Terry T., Aircraft icing, "*A pilot's guide to supercooled drizzle droplets Icing Accident cases weather techniques*", McGraw-Hill Book Company, pp 79-80, 1999.
13. Site de Zodiac, G. *Système de dégivrage*, visité le 21 novembre 2009, http://www.aerosafety.zodiac.com/aerazur/index-fr.php?p=sub_elastomer_deicing.
14. Transports Canada., (2005), "*Lignes directrices pour les aéronefs lors de givrage au sol*", in Rapport TP 14052F, avril 2005.
15. SAE, A., (2007), "*Deicing/Anti-Icing Fluid, Aircraft SAE Type*", (AMS 1424).
16. SAE, A., (2007), "*Fluid, Aircraft Deicing/Anti-Icing, Non-Newtonian (Pseudoplastic), SAE Types II, III, and I*", AMS 1428.
17. SAE. A., (2007), "*Standard Test Method for Aerodynamic Acceptance of SAE AMS 1424 and SAE AMS 1428 Aircraft Deicing/Anti-icing Fluids*", AS5900b.
18. SAE, A., (2003) "*Water Spray and High Humidity Endurance Test Methods for SAE AMS 1424 and SAE AMS 1428 Aircraft Deicing/Anti-icing Fluids*", AS5901.
19. Site du Laboratoire international des matériaux antigivre (LIMA), visité le 25 novembre 2010, <http://www.uqac.ca/amil/>.
20. Bouchard, K., Laforte, JL., et Beisswenger, A., (2001), "*Anti-Icing Endurance Time Tests of Two Certified SAE Type I Aircraft Deicing Fluids*", FAA.
21. SAE, A., (2007) "*Endurance Time Tests for Aircraft Deicing/Anti-icing Fluids SAE Type II, III, and IV*", ARP5485.
22. Beisswenger, A. et J. Perron, (2006), "*Indoor Snow Testing of Aircraft Ground Anti-Icing Fluids*", FAA.
23. LIMA, (2008), Rapport "*Essais de neige en chambre climatique*".
24. M. CONDE ENGINEERING, (2002), "*Properties of Working Fluid*", visité le 16 novembre 2010, <http://www.mrc-eng.com/>.

25. Beisswenger, A. et Laforte, J.L., (2003), "*Endurance and Aerodynamic Performance Certification of Aircraft De/Anti-icing Fluid*", SAE International.
26. Bernardin, S., Dubuisson, C. et Laforte, J.L., (1997), "*Development of Laboratory Test Procedures to Replace Field Anti-icing Fluid Tests (Snow equivalence tests)*", Rapport TP13141, novembre 1997.

ANNEXE A

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES ESSAIS PRINCIPAUX

ANNEXE A

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES ESSAIS PRINCIPAUX

A.1 Conditions climatiques

Tableau A-1 : Conditions expérimentales

Condition (C)	Intensité neige (g/dm ² /h)		Température			
			Air (°C)		Plaque (°C)	
1	10	±0,6	-5	±0,5	-4,2	±0,5
2	10	±0,6	-10	±0,5	-11,2	±0,5
3	10	±0,6	-14	±0,5	-15,2	±0,5
4	10	±0,6	-25	±0,5	-26,2	±0,5
5	25	±1,5	-5	±0,5	-5,1	±0,5
6	25	±1,5	-10	±0,5	-12,1	±0,5
7	25	±1,5	-14	±0,5	-16,1	±0,5
8	25	±1,5	-25	±0,5	-27,1	±0,5

A.2 Intensité de 10 g/dm²/h

Les essais effectués à des intensités de 10 g/dm²/h pour les conditions 1 à 4 correspondant aux températures de -5 °C, -10 °C, -14 °C et -25 °C sont présentés dans les prochaines sections

A.2.1 Température de l'air de -5 °C et de la plaque de -4,2 °C

La condition 1 est effectuée à une intensité de 10 g/dm²/h à une température de l'air de -5 °C et une température de plaque de -4,2 °C.

A.2.1.1 Boîte à neige avec de petits trous

– Essai SNWIL079

Le **Tableau A-2** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL079 effectué avec un cylindre à petits trous. La **Figure A-1** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure A-2** présente l'évolution de l'intensité de précipitations de neige et de la masse de neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau A-2 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL079 avec un cylindre à petits trous

Essai	Cd	Date		Intensité neige		Température				Puissance		Temps Endurance		ISTDN
				Taux	Masse	Air		Plaque		Moyenne	Max	Min	sec	
		Journée	Heure	g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²			
079	1	2009-12-09	10 h 10	10,0±12,8	61,69	-4,6±0,9	-5,3	-4,5±0,5	-4,2	0,6±0,7	1,4	354	53	2,219

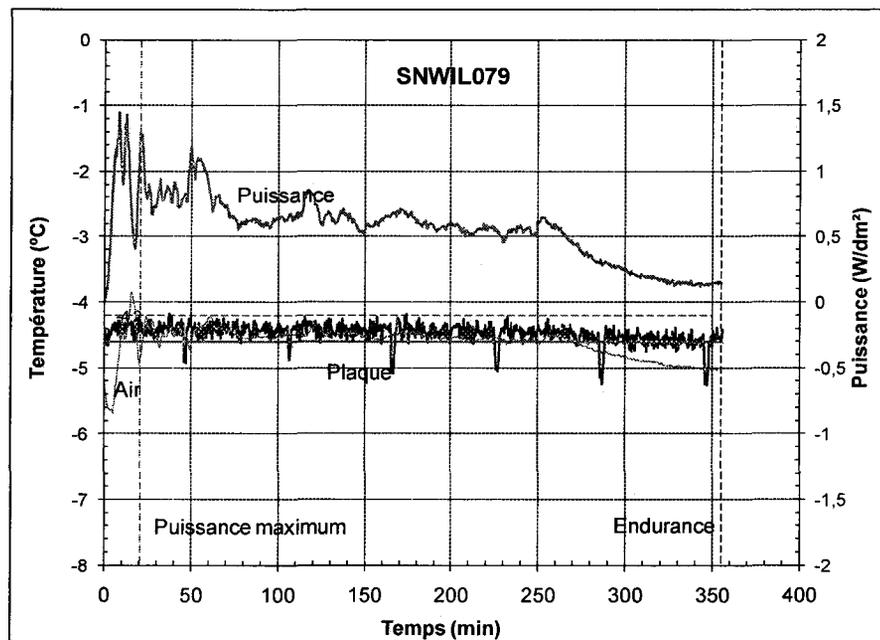


Figure A-1 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 1 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL079

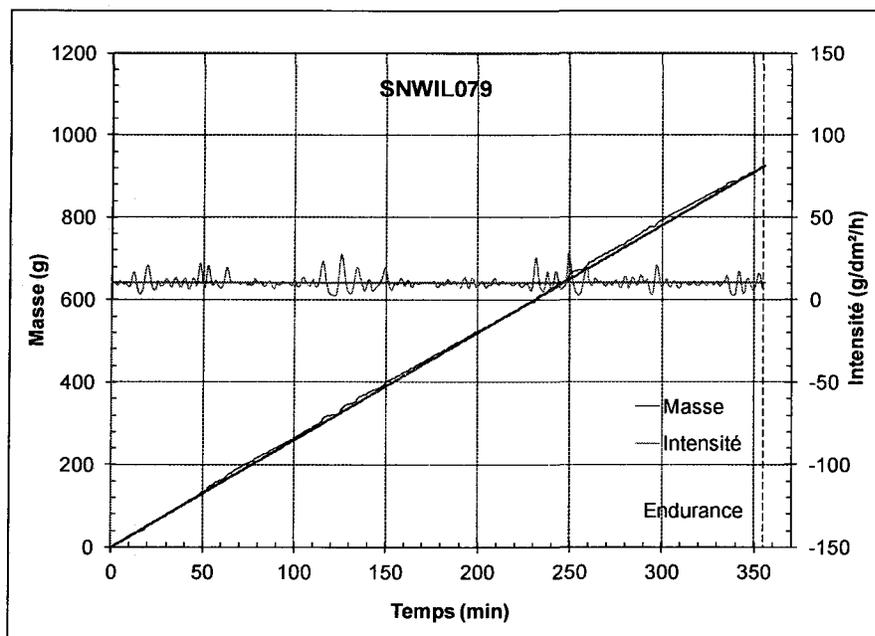


Figure A-2 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 1 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL079

A.2.1.2 Boîte à neige avec de gros trous

– Essai SNWIL084

Le **Tableau A-3** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL084 effectué avec un cylindre à gros trous. La **Figure A-3** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure A-4** présente l'évolution de l'intensité des précipitations de neige et la masse de neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau A-3 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL084 avec un cylindre à gros trous

Essai	Cd	Date		Intensité neige		Température				Puissance		Temps		ISTDN
				Taux	Masse	Air		Plaque				Endurance		
		Journée	Heure	g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne	Min	Permanent	Max	Moyenne	Max	Min	sec	
084	1	2009-12-17	9 h	10,4±17,6	4,11	-5,5 ± 0,8	-5,3	-5,5±0,8	-4,1	0,5±0,9	1,8	270	52	1,695

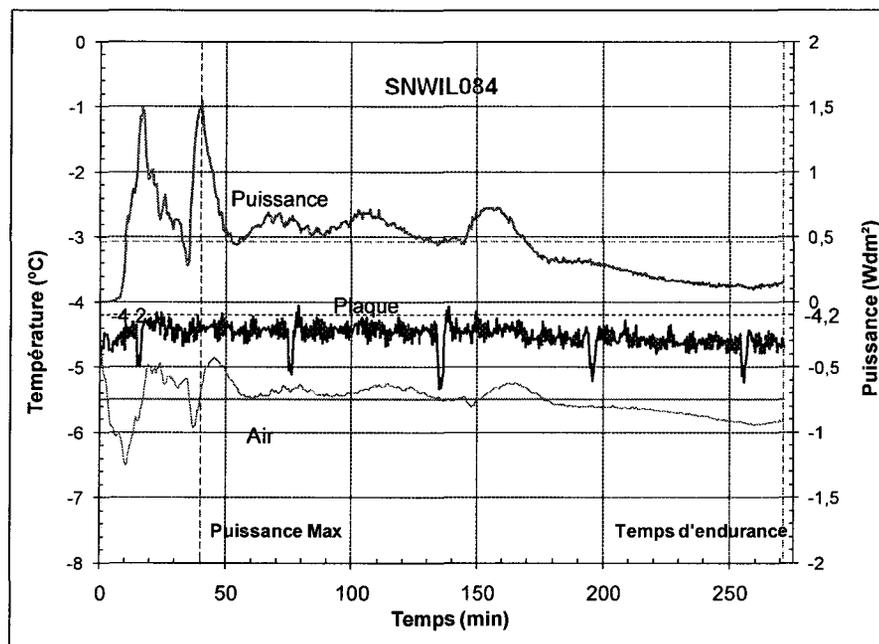


Figure A-3 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 1 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL084

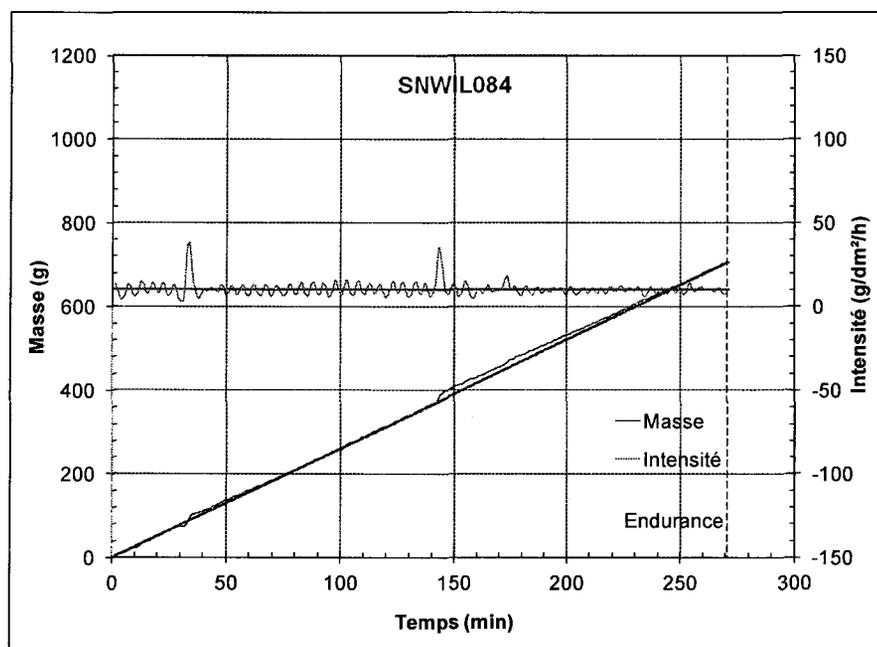


Figure A-4 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 1 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL084

A.2.2 Température de l'air de -10 °C et de la plaque de -11,2 °C

La condition 2 est effectuée à une intensité de 10 g/dm²/h, à une température de l'air de -10 °C et une température de plaque de -11,2 °C.

A.2.2.1 Boîte à neige avec de petits trous

– Essai SNWIL062

Le **Tableau A-4** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL062 effectué avec un cylindre à petits trous. La **Figure A-5** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure A-6** présente l'évolution de l'intensité des précipitations de neige et la masse de neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau A-4 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL062 avec un cylindre à petits trous

Essai	Cd	Date		Intensité neige		Température				Puissance		Temps Endurance		ISTDN
				Taux	Masse	Air		Plaque		Moyenne	Max	Min	sec	
		Journée	Heure	g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²			
062	2	2009-11-16	11 h 5	10,5±7,7	21,67	-11,1±0,2	-11,2	-10,7±0,1	-9,5	0,2±0,3	0,6	108	09	0,780

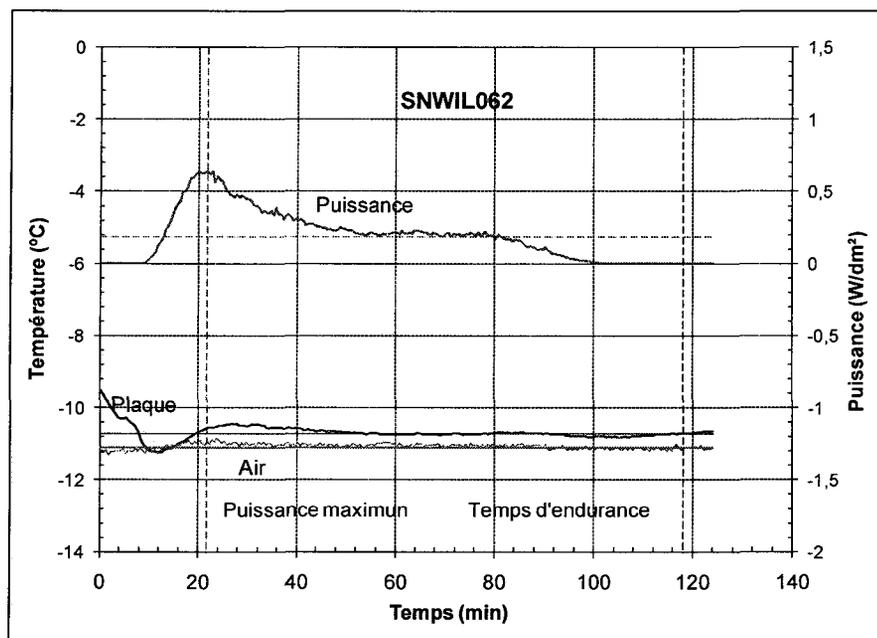


Figure A-5 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 2 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL062

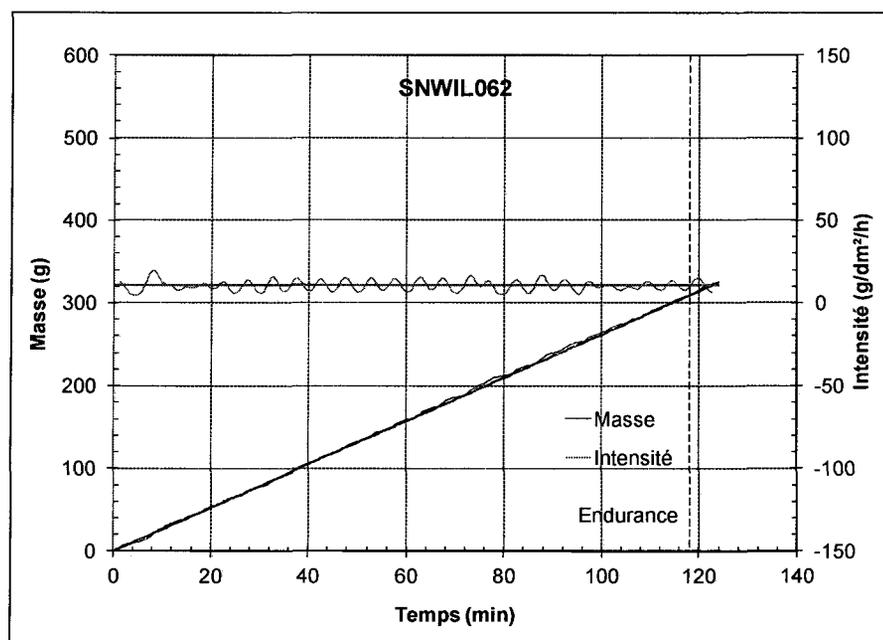


Figure A-6 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 2 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL062

A.2.2.2 Boîte à neige avec de gros trous

– Essai SNWIL059

Le **Tableau A-5** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL059 effectué avec un cylindre à gros trous. La **Figure A-7** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure A-8** présente l'évolution de l'intensité des précipitations de neige et la masse de neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau A-5 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL059 avec un cylindre à gros trous

Essai	Cd	Date		Intensité neige		Température				Puissance		Temps Endurance		ISTDN
				Taux	Masse	Air	Plaque			Moyenne	Max	Min	sec	
		Journée	Heure	g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	Moyenne W/dm ²	Max W/dm ²			
059	2	2009-11-12	12 h 30	10,0±6,7	20,11	-11,0±0,2	11,3	-10,9±0,0	-10,0	0,20±0,4	0,8	114	30	0,724

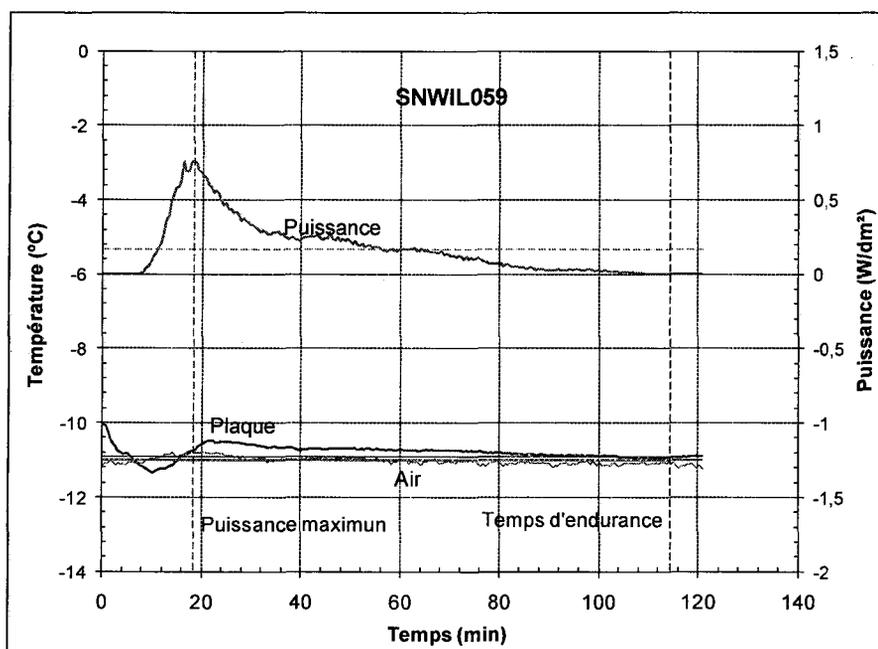


Figure A-7 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 2 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL059

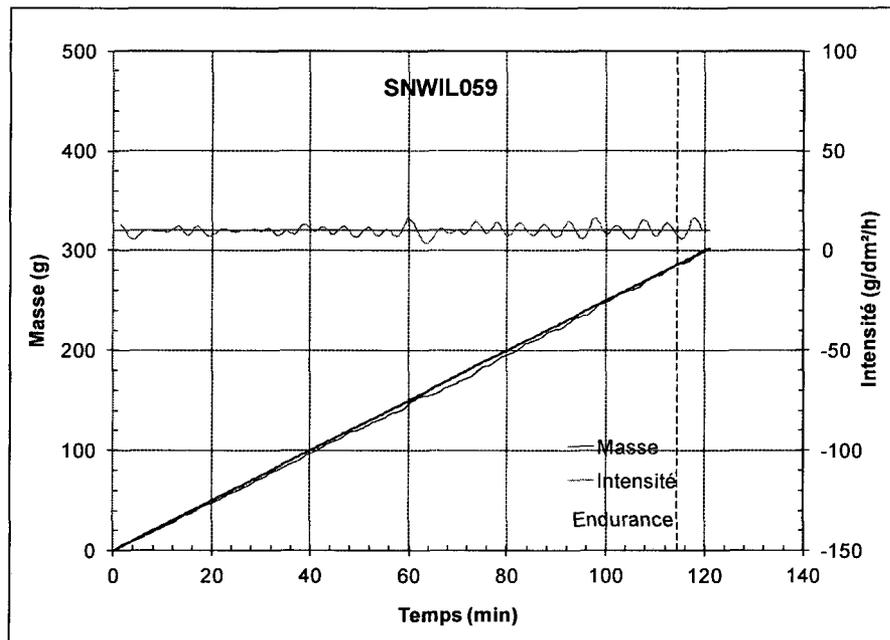


Figure A-8 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 2 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL059

A.2.3 Température de l'air de -25 °C et de la plaque de $-26,2\text{ °C}$

La condition 4 est effectuée à une intensité de $10\text{ g/dm}^2/\text{h}$, à une température de l'air de -25 °C et une température de plaque de $-26,2\text{ °C}$.

A.2.3.1 Boîte à neige avec de petits trous

– Essai SNWIL048

Le **Tableau A-6** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL048 effectué avec un cylindre à petits trous. La **Figure A-9** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure A-10** présente l'évolution de l'intensité des précipitations de neige et la masse de

neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau A-6 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL048 avec un cylindre à petits trous

Essai	Cd	Date		Intensité neige		Température				Puissance		Temps Endurance		ISTDN
				Taux	Masse	Air	Plaque			Moyenne	Max	Min	sec	
		Journée	Heure	g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	Moyenne W/dm ²	Max W/dm ²			
048	4	2009-11-04	11 h	10,3±14,2	7,40	-25,7±0,1	-22,6	-22,5±0,1	-22,4	0,0±0,0	0,0	41	57	0,267

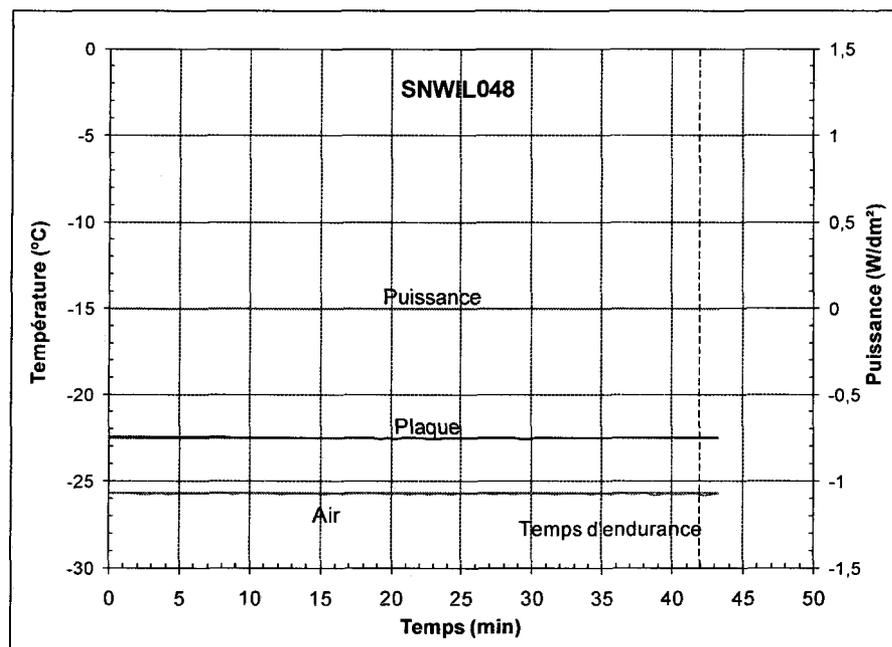


Figure A-9 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 4 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL048

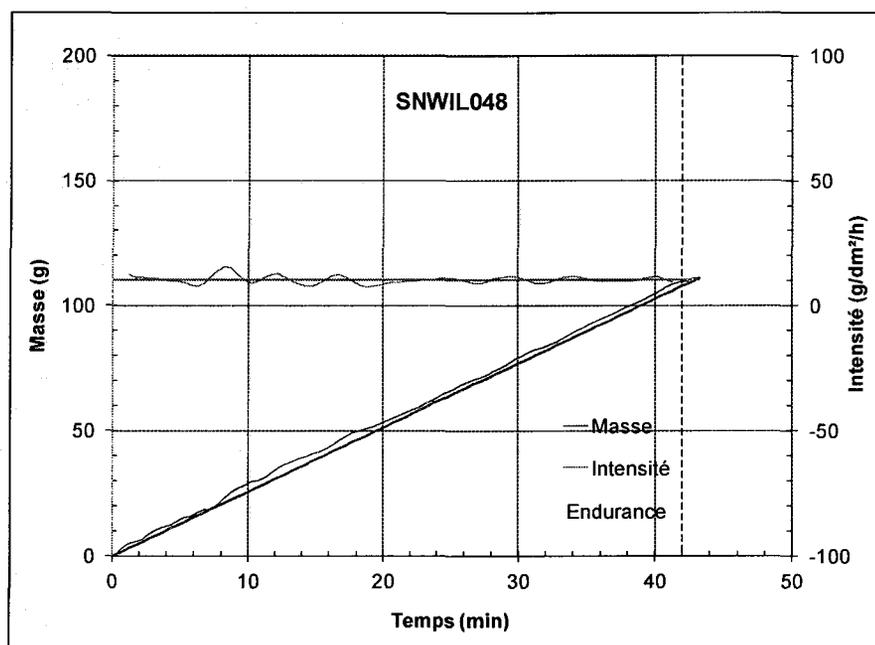


Figure A-10 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 4 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL048

A.2.3.2 Boîte à neige avec de gros trous

– Essai SNWIL046

Le **Tableau A-7** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL046 effectué avec un cylindre à gros trous. La **Figure A-11** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure A-12** présente l'évolution de l'intensité des précipitations de neige et la masse de neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau A-7 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL046 avec un cylindre à gros trous

Essai	Cd	Date		Intensité neige		Température				Puissance		Temps Endurance		ISTDN
				Taux	Masse	Air		Plaque		Moyenne	Max	Min	sec	
		Journée	Heure	g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	Moyenne W/dm ²	Max W/dm ²			
046	4	2009-11-04	8 h 15	9,7±7,8	8,79	-25,9±0,1	-22,6	-22,5±0,1	-22,3	0,0±0,0	0,0	45	30	0,316

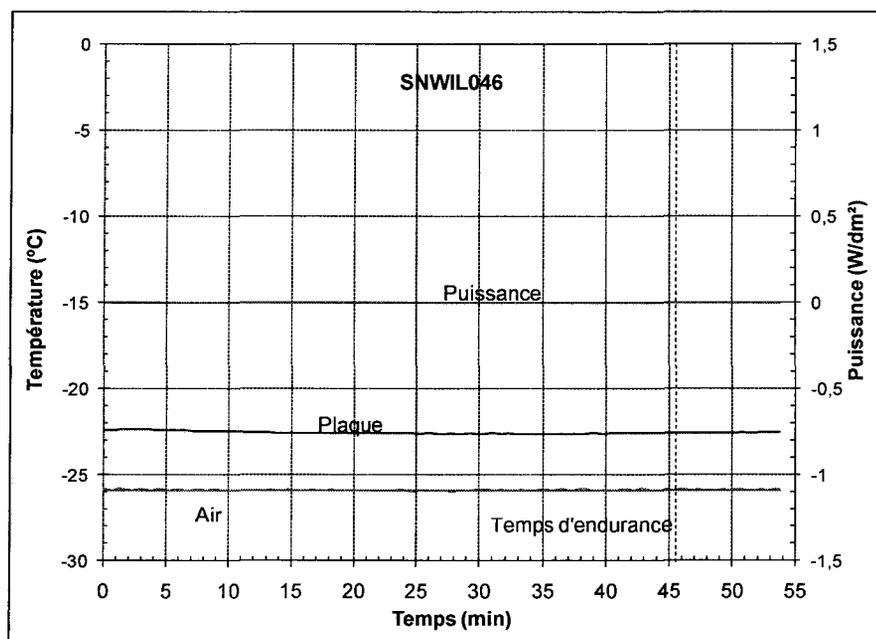


Figure A-11 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 4 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL046

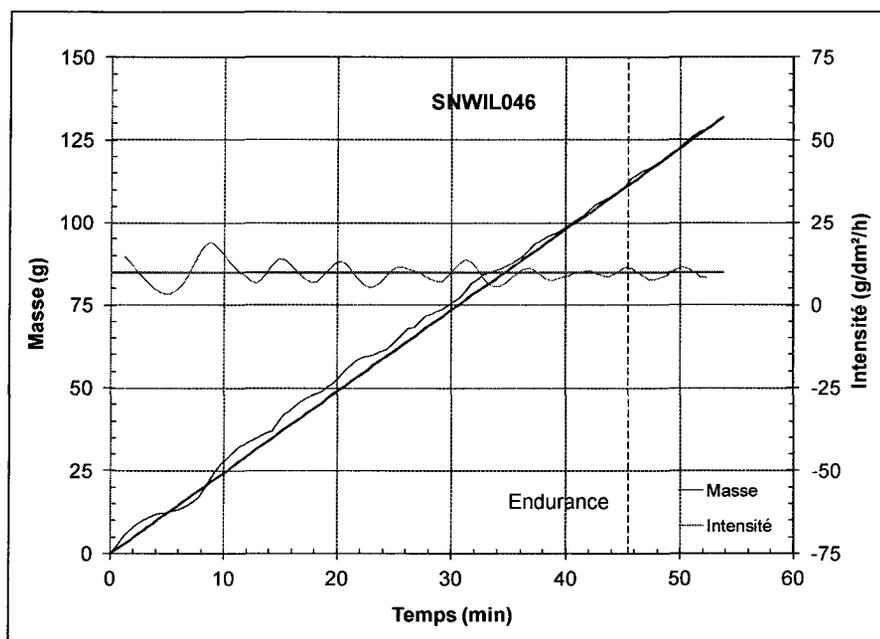


Figure A-12 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 4 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL046

A.3 Intensité de 25 g/dm²/h

Les essais effectués à des intensités de 25 g/dm²/h pour les conditions 5 à 8 correspondant aux températures de -5 °C, -10 °C, -14 °C et -25 °C sont présentés dans les prochaines sections.

A.3.1 Température de l'air de -5 °C et de la plaque de -5,1 °C

La condition 5 est effectuée à une intensité de 25 g/dm²/h, à une température de l'air de -5 °C et une température de plaque de -5,1 °C.

A.3.1.1 Boîte à neige avec de petits trous

– Essai SNWIL080

Le **Tableau A-8** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL080 effectué avec un cylindre à petits trous. La **Figure A-13** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure A-14** présente l'évolution de l'intensité des précipitations de neige et la masse de neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau A-8 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL080 avec un cylindre à petits trous

Essai	Cd	Date		Intensité neige		Température				Puissance		Temps Endurance		ISTDN
				Taux	Masse	Plaque				Moyenne	Max	Min	sec	
		Journée	Heure	g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²			
080	5	2009-12-10	10 h 10	24,6±29,6	66,38	-5,3±1,3	-5,4	-4,5±0,7	-4,0	1,0±1,1	2,2	161	42	2,387

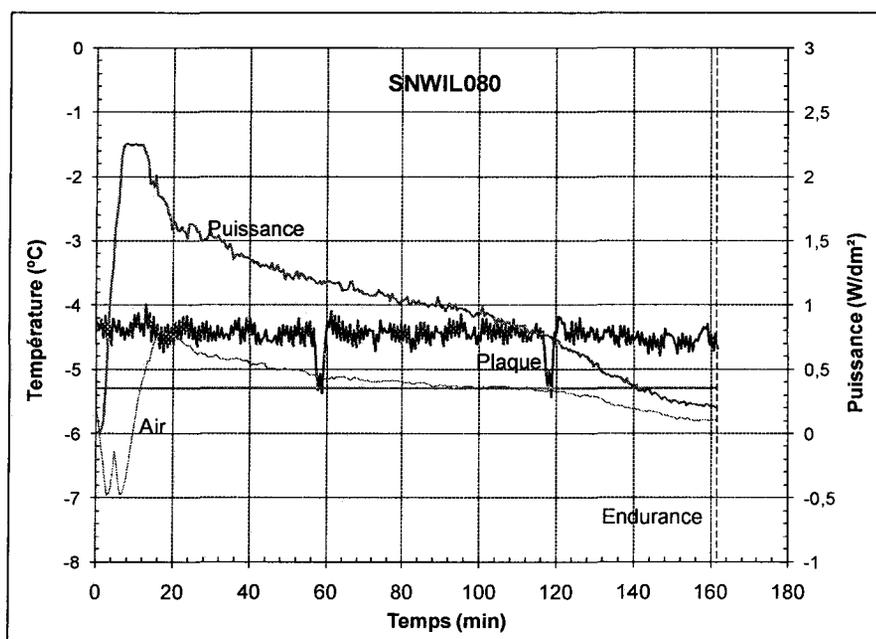


Figure A-13 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 5 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL080

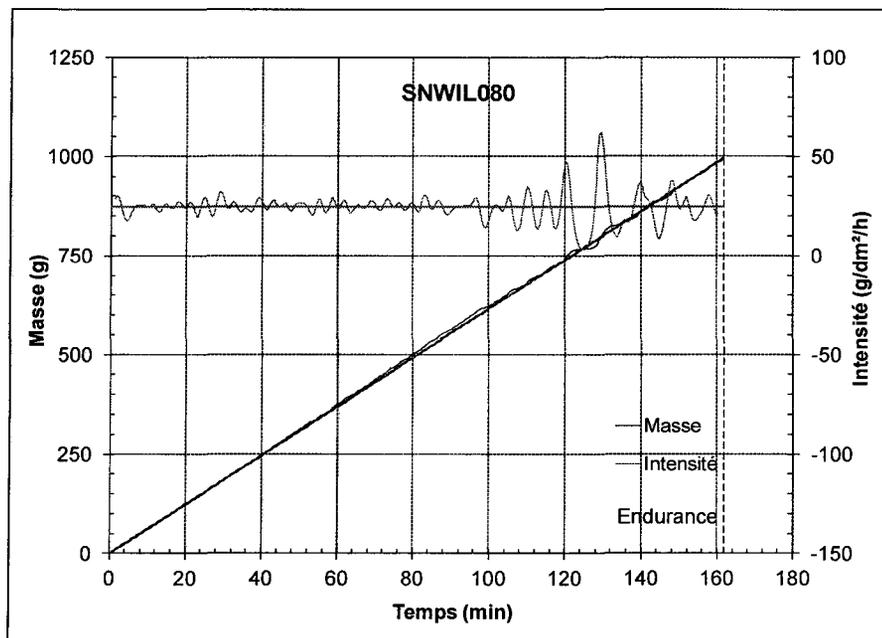


Figure A-14 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 5 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL080

A.3.1.2 Boîte à neige avec de gros trous

– Essai SNWIL081

Le **Tableau A-9** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL081 effectué avec un cylindre à gros trous. La **Figure A-15** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure A-16** présente l'évolution de l'intensité des précipitations de neige et la masse de neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau A-9 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL081 avec un cylindre à gros trous

Essai	Cd	Date		Intensité neige		Température				Puissance		Temps Endurance		ISTDN
				Taux	Masse	Air	Plaque			Moyenne	Max	Min	sec	
		Journée	Heure	g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	Moyenne W/dm ²	Max W/dm ²			
081	5	2009-12-10	13 h 30	23,8±20,3	59,05	-5,4±1,2	-5,4	-4,5±0,7	-4,0	1,0±1,1	2,2	149	12	2,124

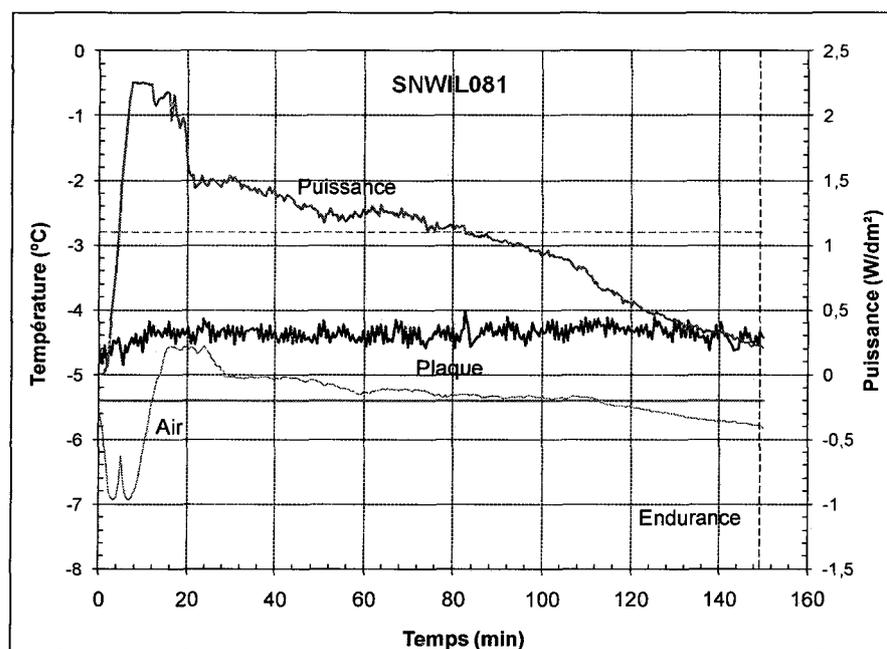


Figure A-15 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 5 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL081

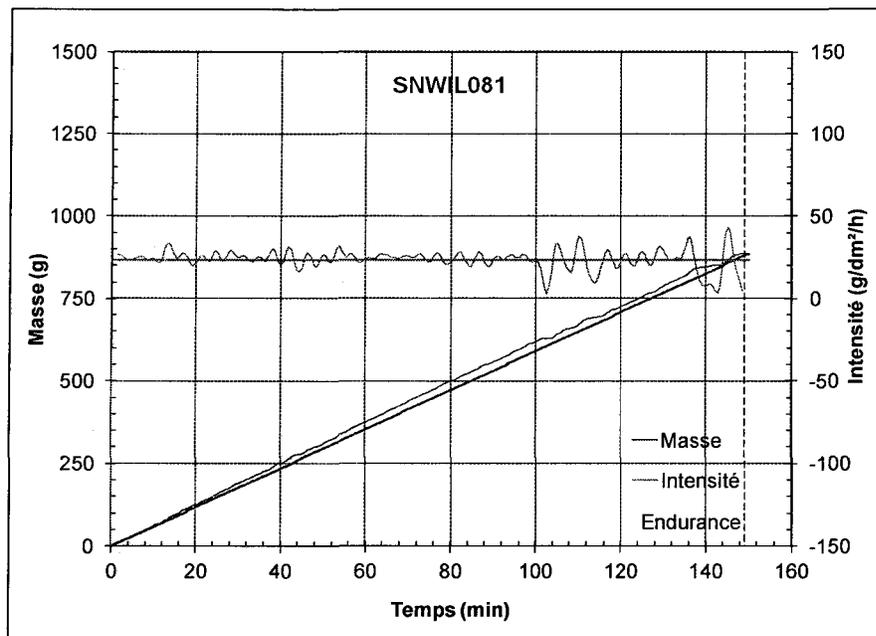


Figure A-16 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 5 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL081

A.3.2 Température de l'air de -10 °C et de la plaque de -12,1 °C

La condition 6 est effectuée à une intensité de 25 g/dm²/h, à une température de l'air de -10 °C et une température de plaque de -12,1 °C.

A.3.2.1 Boîte à neige avec de petits trous

– Essai SNWIL041

Le **Tableau A-10** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL041 effectué avec un cylindre à petits trous. La **Figure A-17** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure A-18** présente l'évolution de l'intensité des précipitations de neige et la masse de

neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau A-10 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL041 avec un cylindre à petits trous

Essai	Cd	Date		Intensité neige		Température				Puissance		Temps Endurance		ISTDN
				Taux	Massc	Air		Plaque		Moyenne	Max	Min	sec	
		Journée	Heure	g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	Moyenne W/dm ²	Max W/dm ²			
041	6	2009-11-02	9 h	24,7±7,9	22,67	-11,2±0,4	-12	-11,1±0,2	-9	0,4±0,6	1,2	50	00	0,815

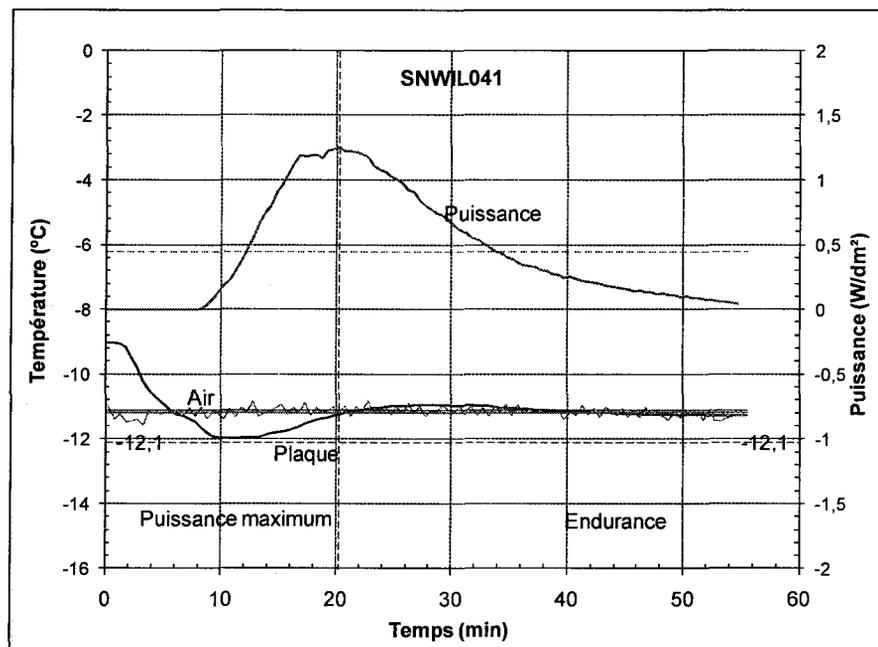


Figure A-17 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 6 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL041

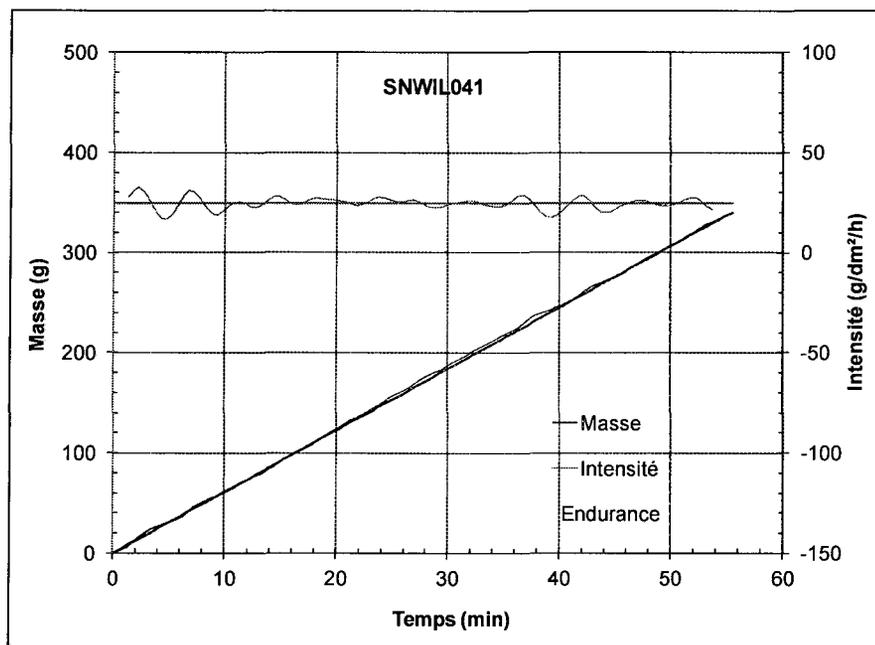


Figure A-18 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 6 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL041

A.3.2.2 Boîte à neige avec de gros trous

– Essai SNWIL063

Le **Tableau A-11** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL063 effectué avec un cylindre à gros trous. La **Figure A-19** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure A-20** présente l'évolution de l'intensité des précipitations de neige et la masse de neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau A-11 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL063 avec un cylindre à gros trous

Essai	Cd	Date		Intensité neige		Température				Puissance		Temps Endurance		ISTDN
				Taux	Masse	Air		Plaque		Moyenne	Max	Min	sec	
		Journée	Heure	g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²			
063	6	2009-11-16	14 h 40	24,8±6,3	19,56	-11,1±0,2	-9,8	9,4±0,4	-9,0	0,3±0,5	1,1	41	25	0,703

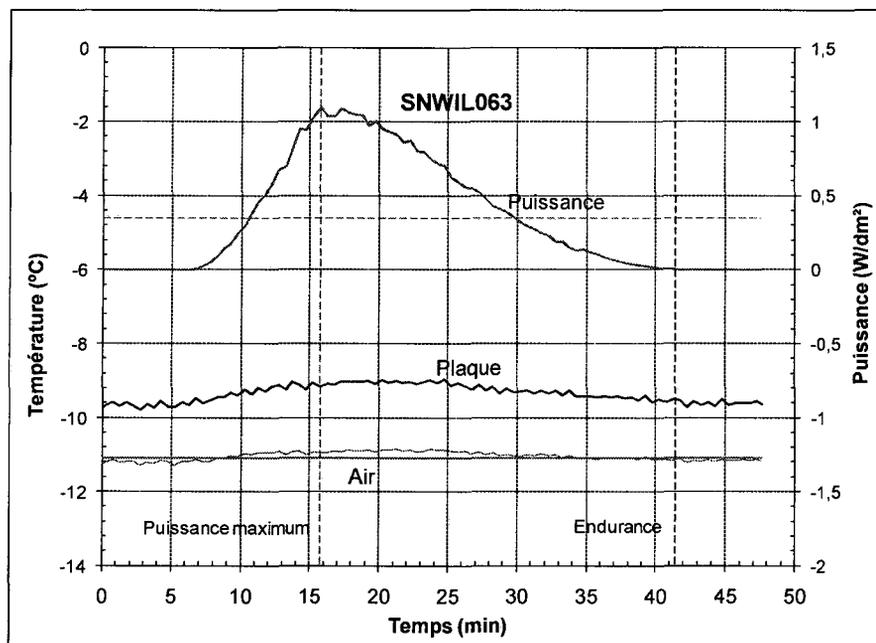


Figure A-19 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 6 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL063

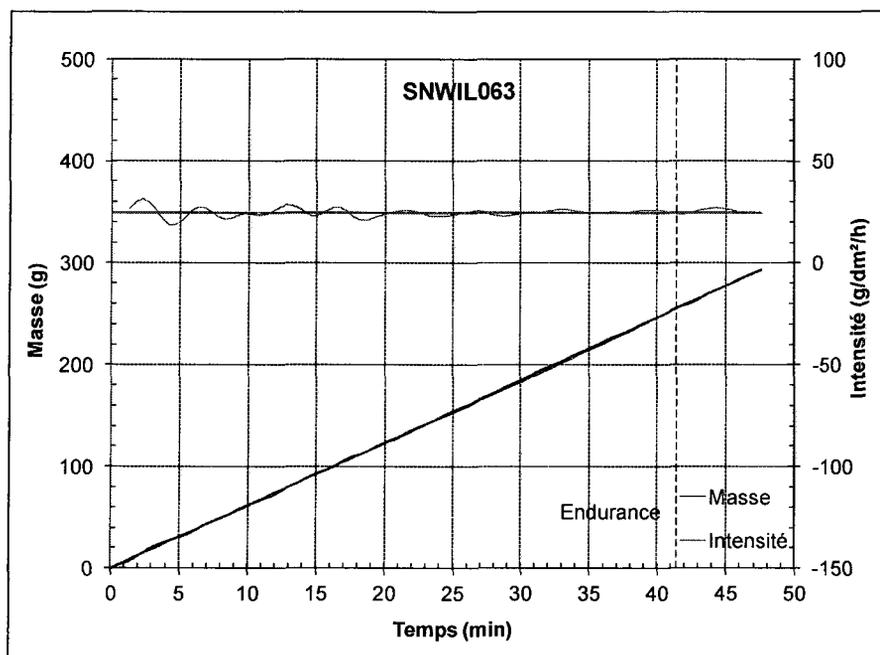


Figure A-20 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 6 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL063

A.3.3 Température de l'air de -14 °C et de la plaque de -16,1 °C

La condition 7 est effectuée à une intensité de 25 g/dm²/h, à une température de l'air de -14 °C et une température de plaque de -16,1 °C.

A.3.3.1 Boîte à neige avec de petits trous

– Essai SNWIL039

Le **Tableau A-12** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL039 effectué avec un cylindre à petits trous. La **Figure A-21** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure A-22** présente l'évolution de l'intensité des précipitations de neige et la masse de neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau A-12 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL039 avec un cylindre à petits trous

Essai	Cd	Date		Intensité neige		Température				Puissance		Temps Endurance		ISTDN
				Taux	Masse	Plaque				Moyenne	Max	Min	sec	
		Journée	Heure	g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²			
039	7	2009-10-30	8 h 50	25,6±12,3	15,54	-14,9±0,1	-15,4	-14,7±0,1	-12,7	0,1±0,3	0,5	32	48	0,559

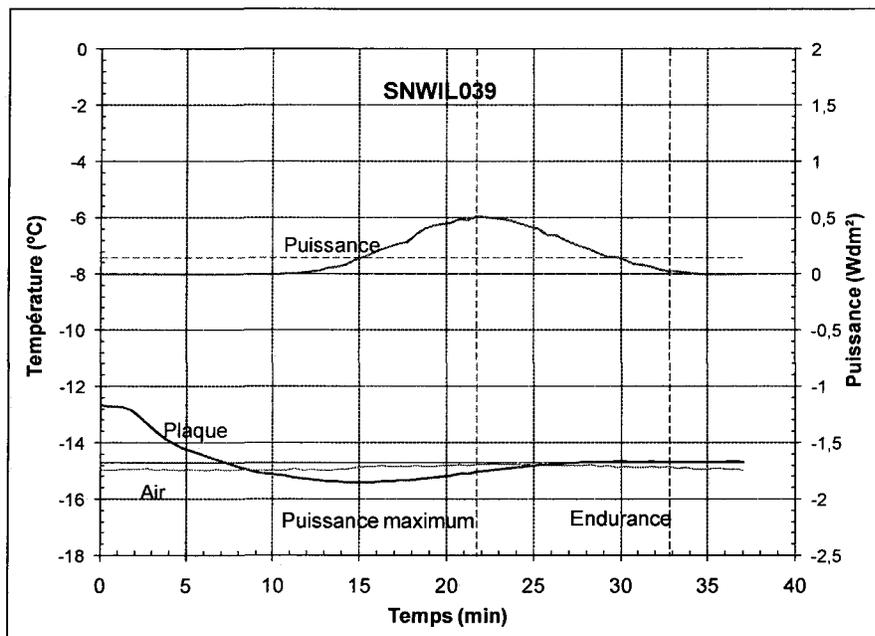


Figure A-21 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 7 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL039

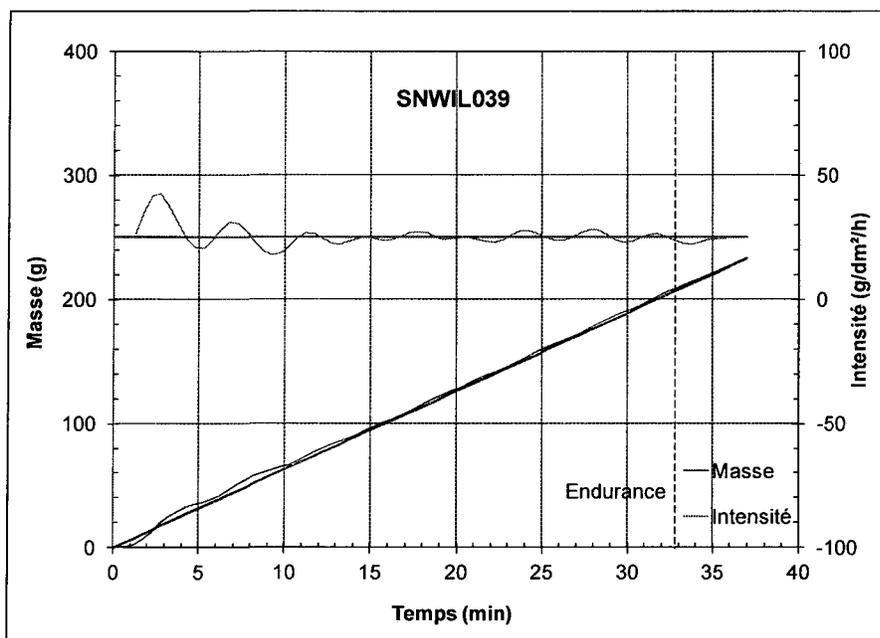


Figure A-22 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 7 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL039

A.3.3.2 Boîte à neige avec de gros trous

– Essai SNWIL066

Le **Tableau A-13** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL066 effectué avec un cylindre à gros trous. La **Figure A-23** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure A-24** présente l'évolution de l'intensité des précipitations de neige et la masse de neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau A-13 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL066 avec un cylindre à gros trous

Essai	Cd	Date		Intensité neige		Température				Puissance		Temps Endurance		ISTDN
				Taux	Masse	Air		Plaque		Moyenne	Max	Min	sec	
		Journée	Heure	g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²			
066	7	2009-11-18	8 h 30	24,8±15,6	22,52	-15,1±0,2	-13,3	-13,0±0,2	-12,8	0,2±0,3	0,7	49	17	0,810

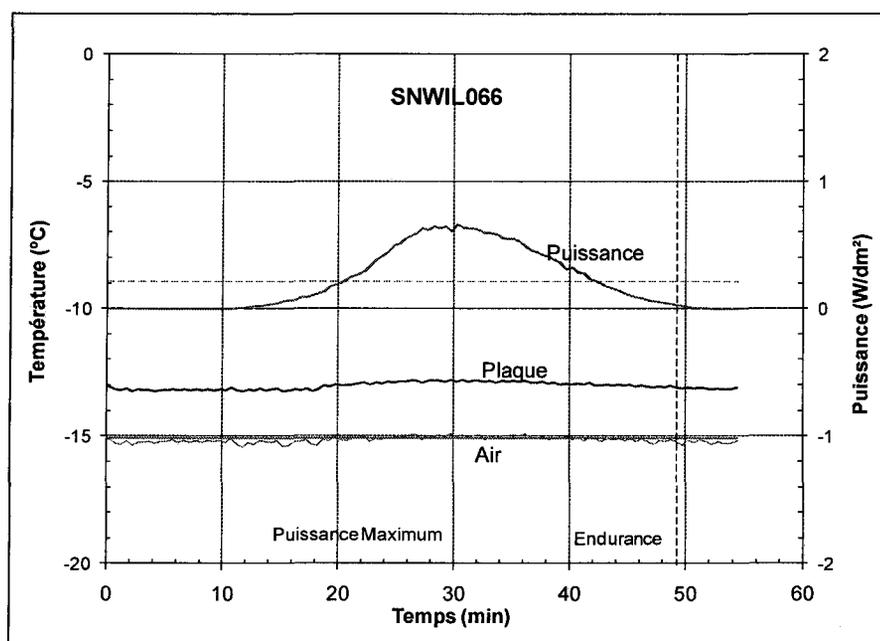


Figure A-23 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 7 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL066

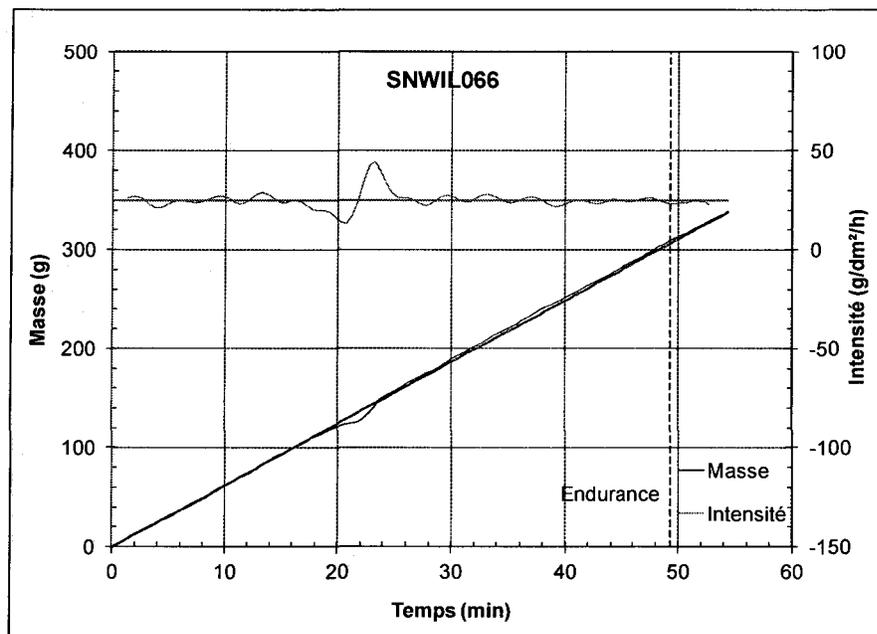


Figure A-24 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 7 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL066

A.3.4 Température de l'air de -25 °C et de la plaque de $-27,1\text{ °C}$

La condition 8 est effectuée à une intensité de $25\text{ g/dm}^2/\text{h}$, à une température de l'air de -25 °C et une température de plaque de $-27,1\text{ °C}$.

A.3.4.1 Boîte à neige avec de petits trous

– Essai SNWIL054

Le **Tableau A-14** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL054 effectué avec un cylindre à petits trous. La **Figure A-25** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure A-26** présente l'évolution de l'intensité des précipitations de neige et la masse de

neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau A-14 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL054 avec un cylindre à petits trous

Essai	Cd	Date		Intensité neige		Température				Puissance		Temps Endurance		ISTDN
				Taux	Masse	Air	Plaque			Moyenne	Max	Min	sec	
		Journée	Heure	g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²			
054	8	2009-11-11	8 h 50	24,8±3,1	12,60	-25,6±0,12	-22,8	-22,6±0,2	-22,3	0,0±0,0	0,0	21	43	0.453

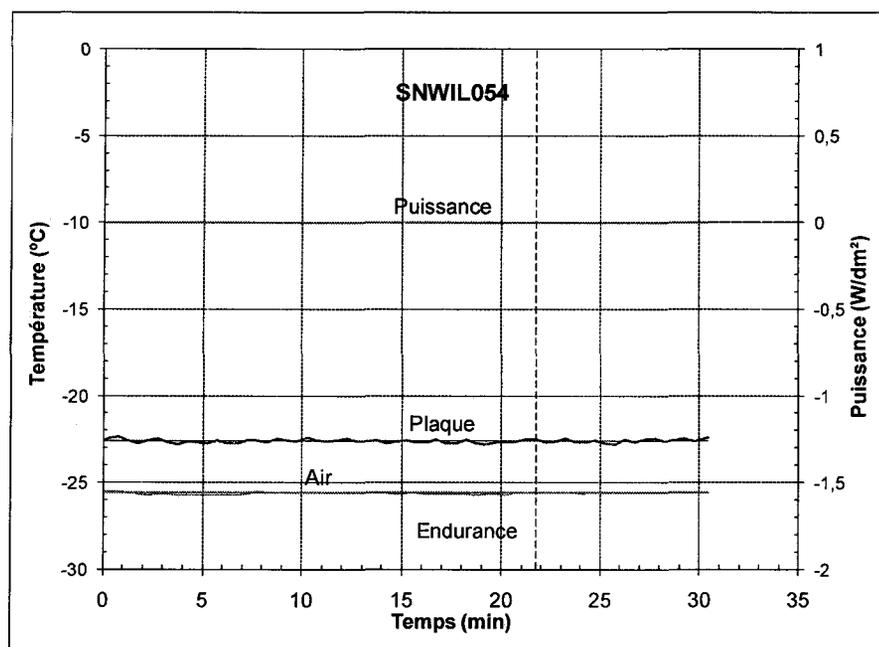


Figure A-25 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 8 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL054

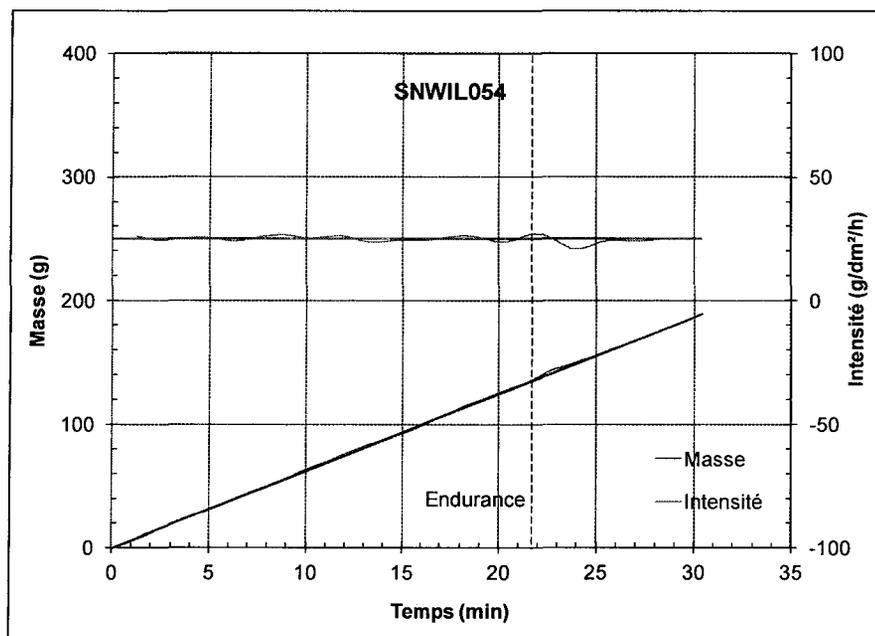


Figure A-26 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 8 avec une boîte à neige à petits trous, essai SNWIL054

A.3.4.2 Boîte à neige avec de gros trous

– Essai SNWIL050

Le **Tableau A-15** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL050 effectué avec un cylindre à gros trous. La **Figure A-27** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure A-28** présente l'évolution de l'intensité des précipitations de neige et la masse de neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau A-15 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL050 avec un cylindre à gros trous

Essai	Cd	Date		Intensité neige		Température				Puissance		Temps Endurance		ISTDN
				Taux	Masse	Air				Plaque		Moyenne	Max	
		g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne	Min	Permanent	Max	W/dm ²	W/dm ²					
050	8	2009-11-16	14 h 40	24,8±6,3	19,56	-11,1±0,2	-9,8	9,4±0,4	-9,0	0,3±0,5	1,1	41	25	0,703

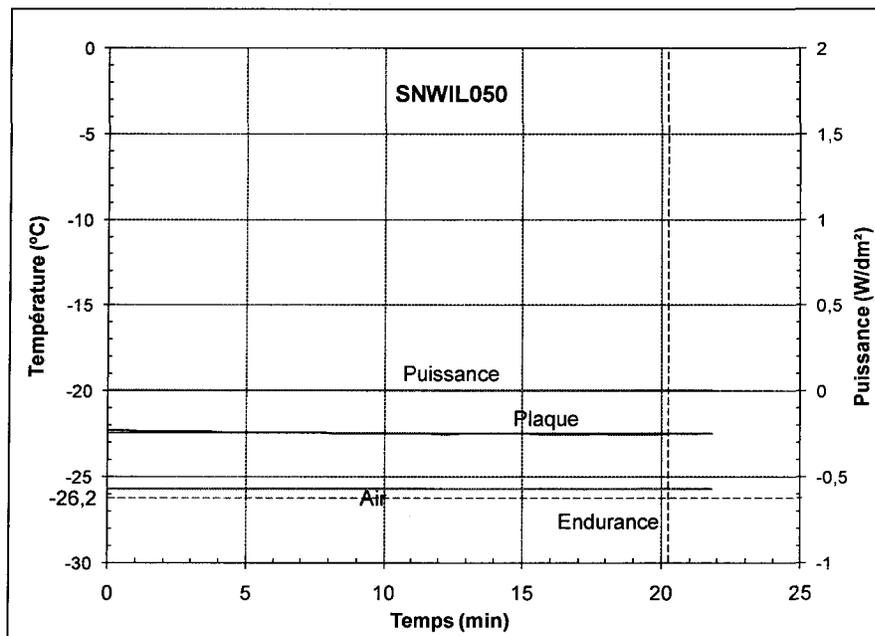


Figure A-27 : Évolution de la puissance et de la température au cours d'un essai de la condition 8 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL050

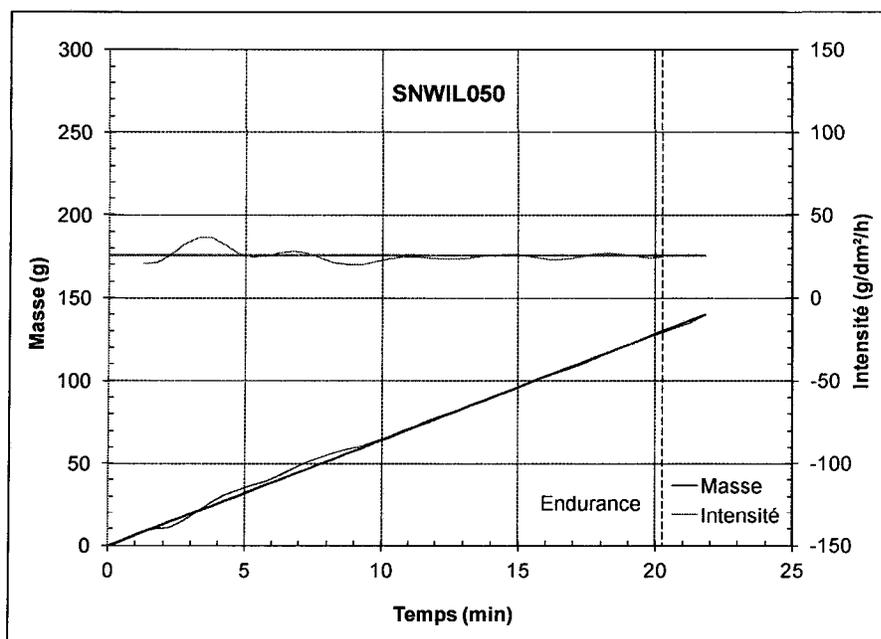


Figure A-28 : Évolution de la masse et de l'intensité des précipitations de neige au cours d'un essai de la condition 8 avec une boîte à neige à gros trous, essai SNWIL050

ANNEXE B

**RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES ESSAIS
COMPLÉMENTAIRES**

ANNEXE B

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES ESSAIS COMPLÉMENTAIRES

B.1 Conditions climatiques

Tableau B-1 : Conditions expérimentales

Condition (C)	Intensiténeige (g/dm ² /h)		Température			
			Air (°C)		Plaque (°C)	
1	10	±0,6	-5	±0,5	-4,2	±0,5
2	10	±0,6	-10	±0,5	-11,2	±0,5
3	10	±0,6	-14	±0,5	-15,2	±0,5
4	10	±0,6	-25	±0,5	-26,2	±0,5
5	25	±1,5	-5	±0,5	-5,1	±0,5
6	25	±1,5	-10	±0,5	-12,1	±0,5
7	25	±1,5	-14	±0,5	-16,1	±0,5
8	25	±1,5	-25	±0,5	-27,1	±0,5

B.2 Intensité de 10 g/dm²/h

Les essais effectués à des intensités de 10 g/dm²/h pour les conditions 3 et 4 correspondant aux températures de -14 °C et -25 °C sont présentés dans les prochaines sections.

B.2.1 Température de l'air de -14 °C et de la plaque de -15,2 °C

Les résultats présentés dans cette section correspondent aux essais réalisés avec la condition 3 où la température de l'air est de -14 °C et la température de la plaque est de -15,2 °C. Pour l'essai SNWIL092, la température du fluide est mesurée au moyen d'un thermocouple et la concentration est calculée théoriquement, et pour l'essai SNWIL0103 un réfractomètre est utilisé pour mesurer la concentration en propylène glycol et la comparer à celle calculée théoriquement.

B.2.1.1 Essai SNWIL092

Le **Tableau B-2** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL092 effectué avec un cylindre à petits trous. La **Figure B-1** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque, du fluide et la température de solidification calculée, et la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure B-2** présente l'évolution de l'intensité des précipitations de neige et la masse de neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau B-2 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL092

Intensité neige		Température							Puissance		Temps Endurance		ISTDN	T-Solidif	C
Taux	Masse	Air		Plaque			Fluide		Moyenne	Max	min	sec			
g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²					
10,2±14,9	15,28	-14,0±0,5	-15,4	-14,8±0,6	-14,2	-15,1	-14,7±0,6	-13,9	0,29±0,42	0,83	89	00	0,550	-11,4	0,280

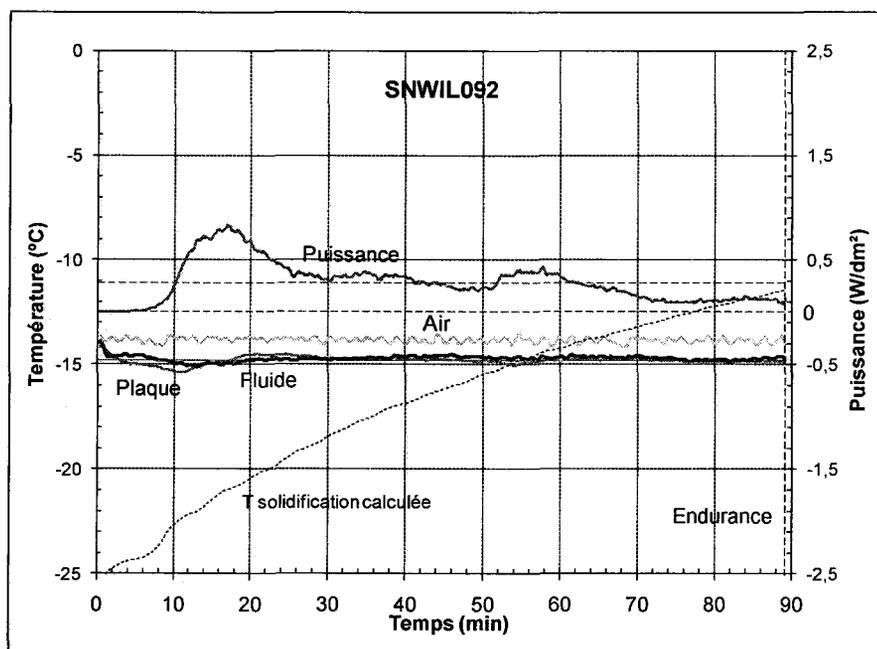


Figure B-1 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL092

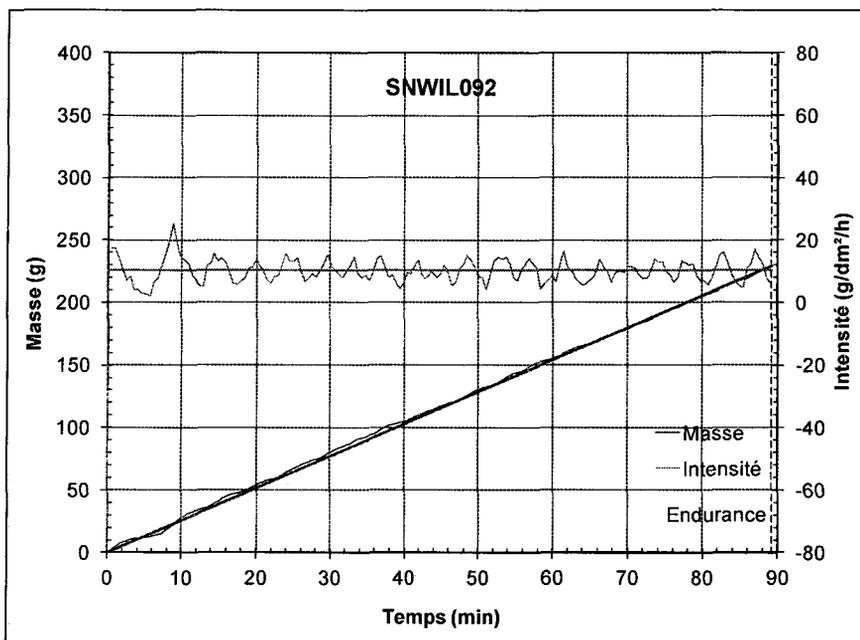


Figure B-2 : Évolution de l'intensité et de la masse des précipitations de neige dans le temps pour l'essai SNWIL092

B.2.1.2 Essai SNWIL0103

Le **Tableau B-3** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL103 effectué avec un cylindre à petits trous. La **Figure B-3** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque, du fluide et la température de solidification mesurée et calculée, et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure B-4** présente l'évolution de l'intensité des précipitations de neige et la masse de neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau B-3 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL103

Intensité neige		Température							Puissance		Temps Endurance		ISTDN	T-Solidif	C
Taux	Masse	Air		Plaque		Fluide			Moyenne	Max	min	sec			
g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²					
10,2±15,1	14,25	-14,8±0,5	-15,3	-14,1±0,9	-13,6	-15,3	-14,8±0,5	-14,3	0,30±0,54	1,07	84	0	0,512	-11,94	0,287

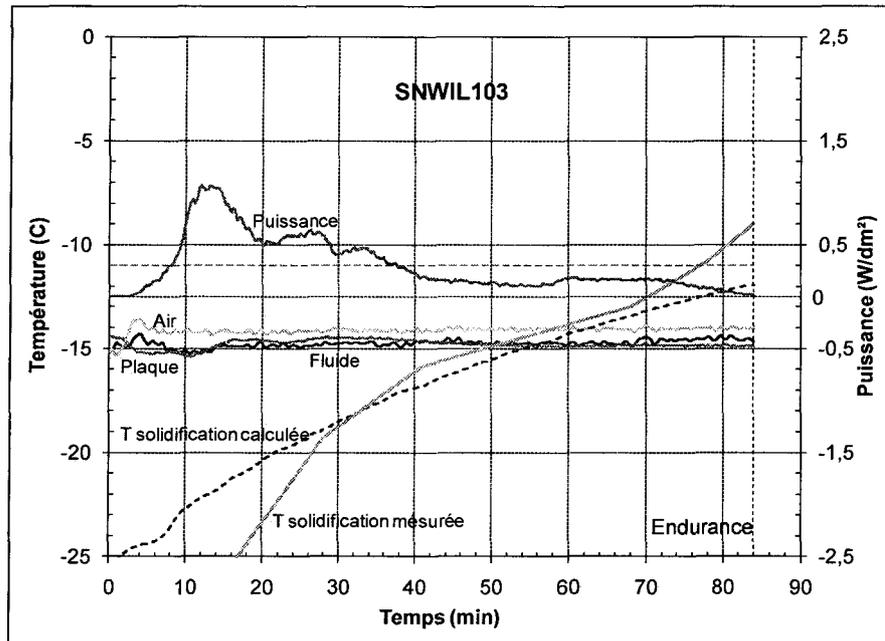


Figure B-3 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL103

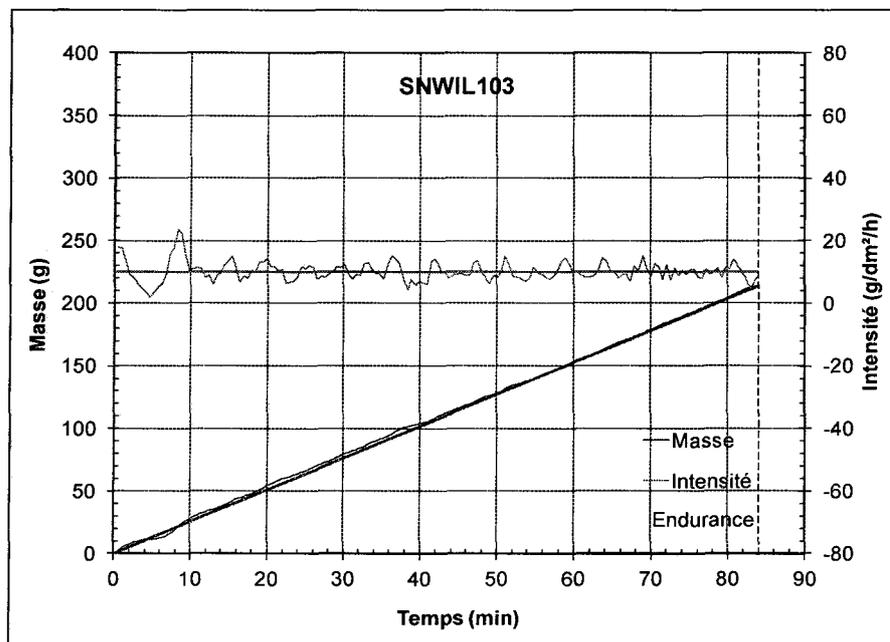


Figure B-4 : Évolution de l'intensité et de la masse des précipitations de neige dans le temps pour l'essai SNWIL103

B.2.2 Température de l'air de -25 °C et de la plaque de -26,2 °C

Deux essais sont réalisés pour les essais complémentaires effectués avec une température de l'air de -25 °C et une température de la plaque de -26,2 °C; ils sont présentés dans le mémoire.

B.3 Intensité de 25 g/dm²/h

Les essais effectués à des intensités de 25 g/dm²/h pour les conditions 7 et 8 correspondant aux températures de -14 °C et -25 °C sont présentés dans les prochaines sections.

B.3.1 Température de l'air de -14 °C et de la plaque de -16,1 °C

Les résultats présentés dans cette section correspondent aux essais réalisés avec la condition 7 où la température de l'air est de -14 °C et la température de la plaque est de -16,1 °C. Pour l'essai SNWIL096, la température de fluide est mesurée au moyen d'un thermocouple ainsi que la concentration qui est calculée théoriquement et, pour l'essai SNWIL0105, un réfractomètre est utilisé pour mesurer la concentration en propylène glycol et la comparer à celle calculée théoriquement.

B.3.1.1 Essai SNWIL096

Le **Tableau B-4** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL096 effectué avec un cylindre à petits trous. La **Figure B-5** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque, du fluide et la température de solidification calculée, et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure B-6** présente l'évolution de

l'intensité des précipitations de neige et la masse de neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau B-4 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL096

Intensité neige		Température							Puissance		Temps Endurance		ISTDN	T-Solidif	C
Taux	Masse	Air	Plaque			Fluide			Moyenne	Max	min	sec			
g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²					
25,3±19,9	18,79	-14,0±0,4	-16,4	-15,6±1,1	-14,1	-15,3	-15,0±0,9	-13,6	0,32±0,53	1,05	43	30	0,676	-10,1	0,262

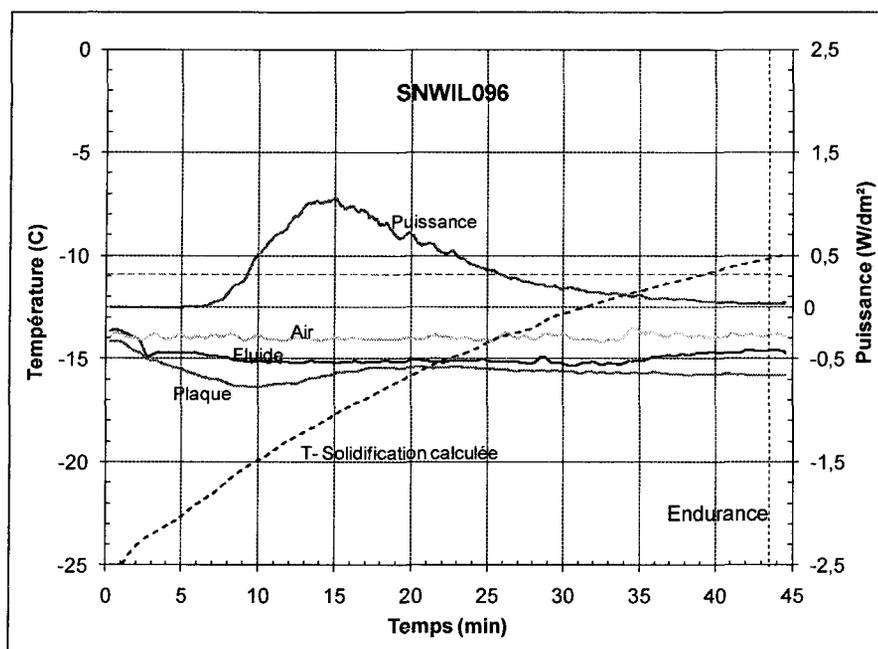


Figure B-5 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL096

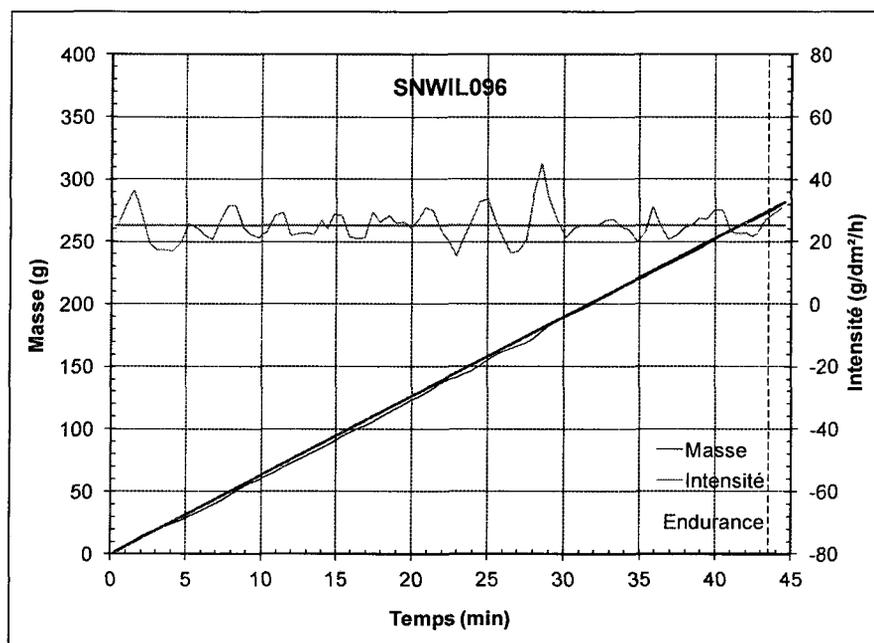


Figure B-6 : Évolution de l'intensité et de la masse des précipitations de neige dans le temps pour l'essai SNWIL096

B.3.1.2 Essai SNWIL0105

Le **Tableau B-5** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL105 effectué avec un cylindre à petits trous. La **Figure B-7** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque, du fluide et la température de solidification mesurée et calculée et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure B-8** présente l'évolution de l'intensité des précipitations de neige et la masse de neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau B-5 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL105

Intensité neige		Température							Puissance		Temps Endurance		ISTDN	T-Solidif	C
Taux	Masse	Air		Plaque			Fluide		Moyenne	Max	min	sec			
g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne	Min	Permanent	Max	Min	Permanent	Max	W/dm ²	W/dm ²					
24,6±12,6	15,31	-14,0±0,2	-16,6	-15,8±0,7	-15,2	-16,1	-15,6±0,8	-14,6	0,56±0,81	1,62	37	30	0,551	-11,41	0,280

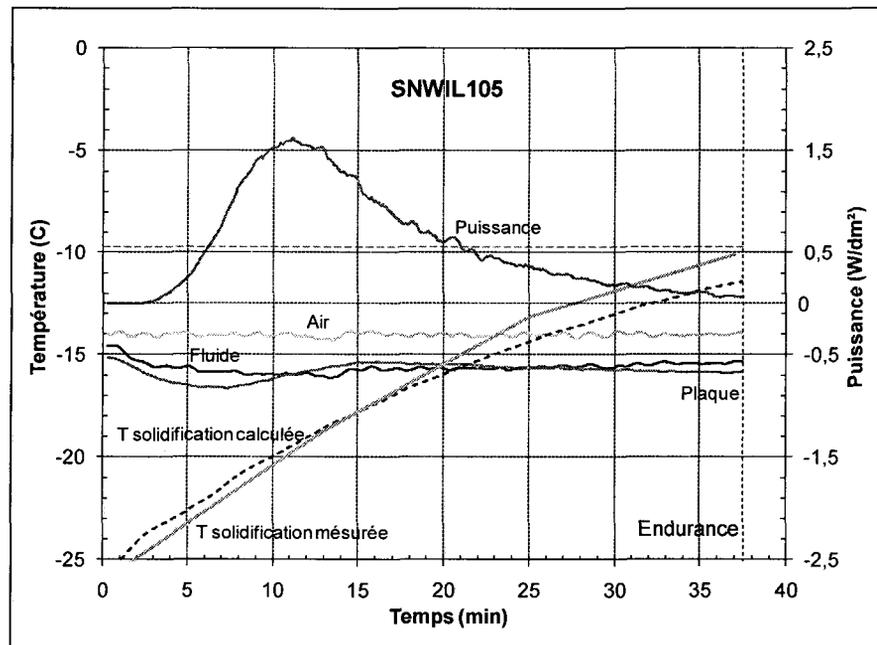


Figure B-7 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL105

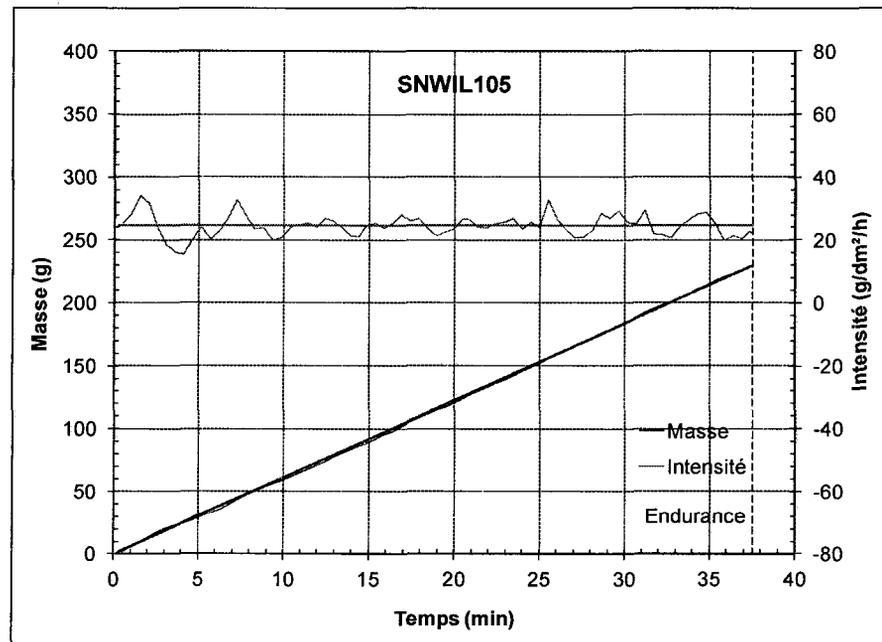


Figure B-8 : Évolution de l'intensité et de la masse des précipitations de neige dans le temps pour l'essai SNWIL105

B.3.2 Température de l'air de -25 °C et de la plaque de -27,1 °C

B.3.2.1 Essai SNWIL 098

Le **Tableau B-6** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL098 effectué avec un cylindre à petits trous. La **Figure B-9** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque, du fluide et la température de solidification calculée, et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure B-10** présente l'évolution de l'intensité des précipitations de neige et la masse de neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau B-6 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL098

Intensité neige		Température							Puissance		Temps Endurance		ISTDN	T-Solidif	C
Taux	Masse	Air		Plaque			Fluide		Moyenne	Max	min	sec			
g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²					
24,4±17,3	9,61	-24,7±0,3	-25,1	-25,0±0,2	-24,7	-25,0	-24,8±0,3	-24,4	0,0±0,0	0,0	23	26	0,346	-14,8	0,324

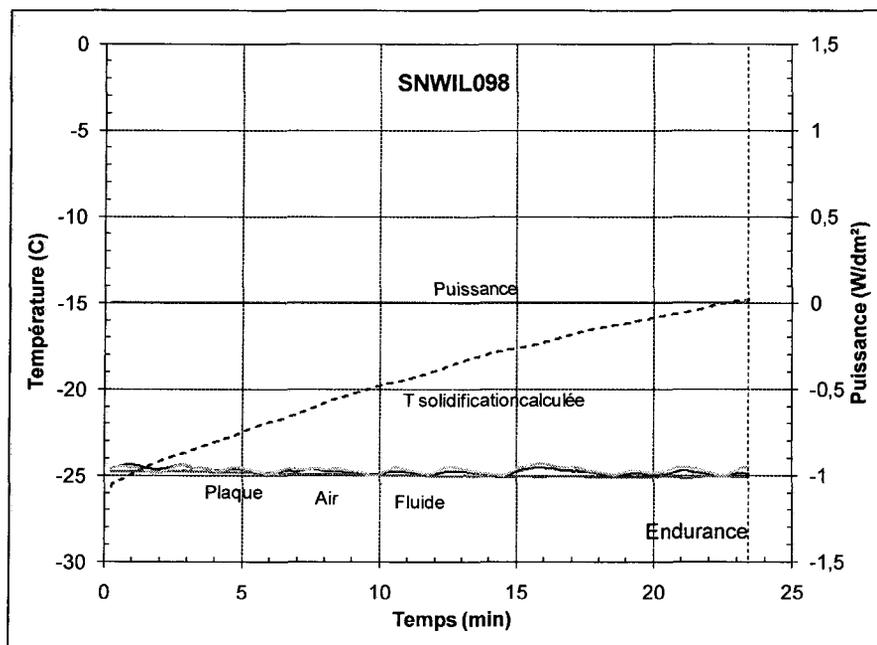


Figure B-9 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL098

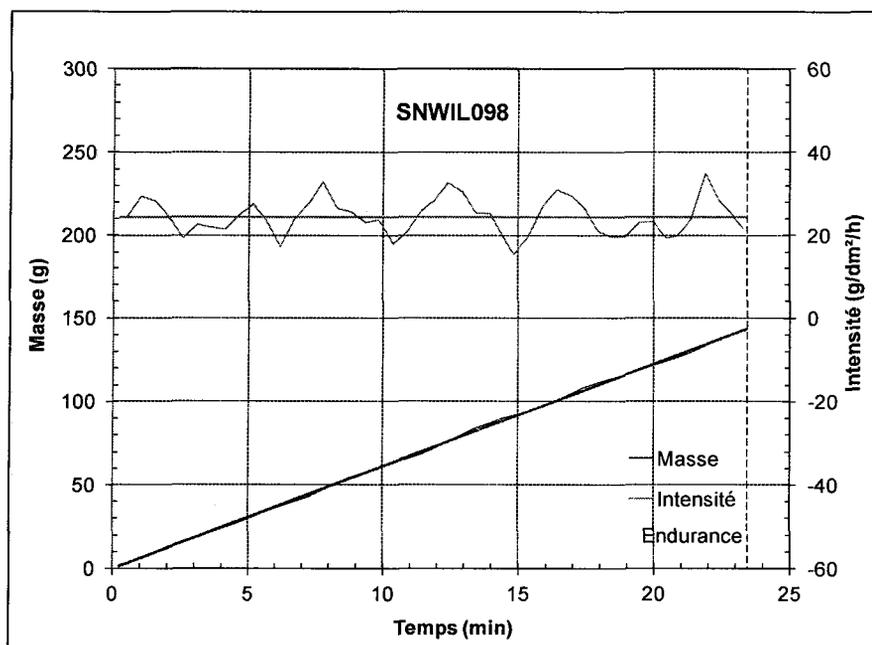


Figure B-10 : Évolution de l'intensité et de la masse des précipitations de neige dans le temps pour l'essai SNWIL098

B.3.2.2 Essai SNWIL108

Le **Tableau B-7** regroupe les résultats obtenus lors de l'essai SNWIL108 effectué avec un cylindre à petits trous. La **Figure B-11** présente l'évolution de la température de l'air, de la plaque, du fluide et la température de solidification mesurée et calculée, et de la puissance dans le temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes, et la **Figure B-12** présente l'évolution de l'intensité des précipitations de neige et la masse de neige accumulée durant l'essai en fonction du temps pour une moyenne fixe sur 30 secondes.

Tableau B-7 : Résultats expérimentaux pour l'essai SNWIL108

Intensité neige		Température							Puissance		Temps Endurance		ISTDN	T-Solidif	C
Taux	Masse	Air		Plaque			Fluide		Moyenne	Max	min	sec			
g/dm ² /h	g/dm ²	Moyenne °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	Min °C	Permanent °C	Max °C	W/dm ²	W/dm ²					
25,4±20,3	8,92	-24,6±0,3	-25,5	-25,3±0,4	-24,7	-25,3	-25,1±0,5	-24,3	0,0±0,0	0,0	21	0	0,321	-15,25	0,330

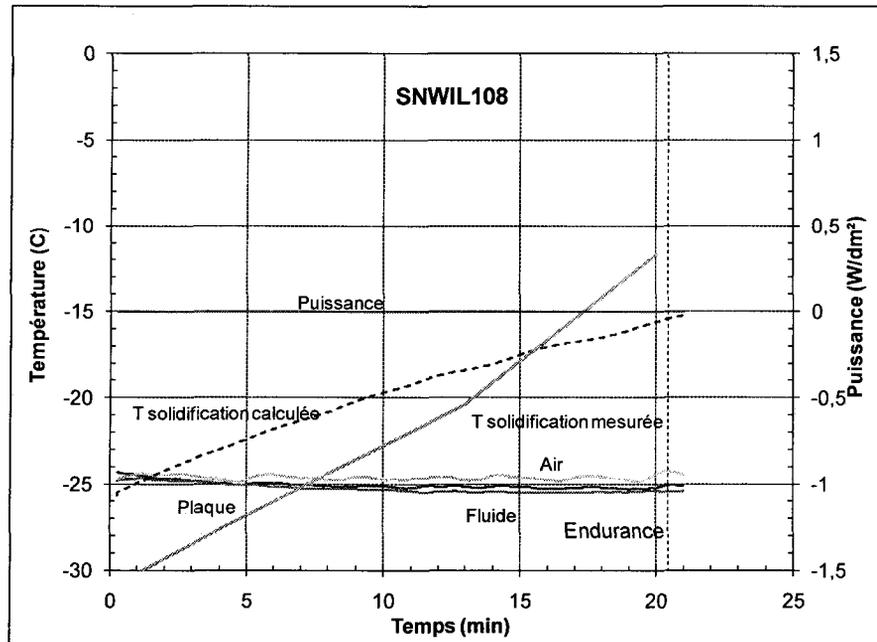


Figure B-11 : Évolution de la puissance et des températures dans le temps pour l'essai SNWIL108

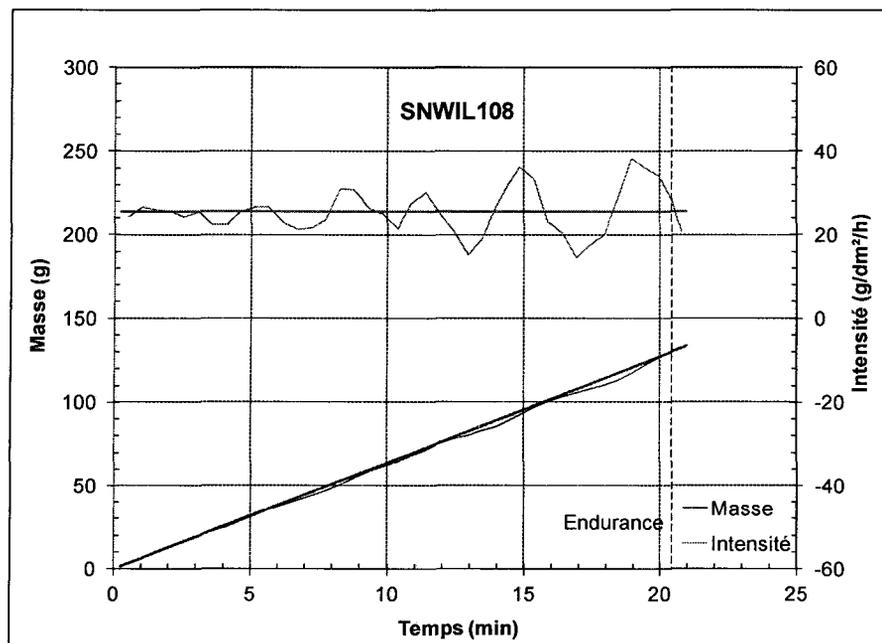


Figure B-12 : Évolution de l'intensité et de la masse des précipitations de neige dans le temps pour l'essai SNWIL108

ANNEXE C
CALCUL DE LA DIFFUSIVITÉ

ANNEXE C

CALCUL DE LA DIFFUSIVITÉ

La diffusion est le mécanisme de mouvement de la matière sous l'effet d'un gradient de concentration, depuis les zones concentrées en matière vers les zones moins concentrées. Il diminue avec la baisse de la température. Le coefficient de diffusion suit une loi d'Arrhenius :

$$D = Ae^{-\frac{B}{T}} \quad \text{Équation 11}$$

D : Coefficient de diffusion en m²/s.

A : Constante en m²/s.

T : Température en K.

B : Constante en K.

Pour avoir des données préliminaires sur la diffusivité de la neige qui tombe sur le fluide, des simplifications ont été faites afin d'avoir les valeurs des constantes A et B.

En supposant que le coefficient de diffusion diminue 10 fois entre -5 et -25 °C, la valeur du coefficient B est de 7652 K. En sachant que le coefficient de diffusion de propylène glycol est de $4,52 \times 10^{-10}$ m²/s pour une température de 23 °C la valeur de la constante A est de 83,22 m²/s.

Le **Tableau C-1** présente les valeurs de coefficient de diffusion à différentes températures d'essai.

Tableau C-1 : Coefficient de diffusion pour les différentes températures

Température (°C)	Coefficient de diffusion (m²/s)
-5	$3,37 \times 10^{-11}$
-10	$1,96 \times 10^{-11}$
-14	$1,25 \times 10^{-11}$
-25	$3,37 \times 10^{-12}$