

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

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

PAR
CAROLINE LAFORTE

**ÉTUDE DE L'ADHÉRENCE DE LA GLACE SUR DES SOLIDES À CARACTÈRE
GLACIOPHOBE**

SEPTEMBRE 2001



Mise en garde/Advice

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

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

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

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

Résumé

Ce mémoire compare et étudie la performance à réduire l'adhérence de la glace de différentes substances commercialement disponibles possédant un caractère glaciophobe. Pour ce faire, l'adhérence de la glace à sept revêtements solides a été mesurée en fonction du nombre de cycles de glaçage/déglaçages. Les revêtements ont également subi un vieillissement accéléré par rayonnement UV afin de pouvoir comparer la durée de leur efficacité lors d'une application réelle. De plus, dans le but d'approfondir les connaissances sur le mécanisme d'adhérence de la glace et sur l'influence des propriétés du revêtement et de la glace sur celle-ci, la rugosité de la surface glacée, l'angle de contact de l'eau sur les revêtements et la taille des grains de glace ont été mesurés et analysés.

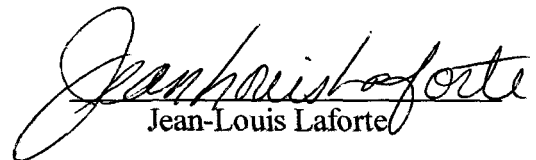
L'adhérence de la glace a été mesurée avec un appareil spécialement conçu au Laboratoire international des matériaux anti-givre (LIMA), qui est basé sur le modèle d'une lame en flexion. La totalité des essais a été effectuée à température constante ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) avec une couche de glace de 13 mm produite à partir de gouttelettes simulant la précipitation de bruine verglaçante. D'après les résultats obtenus, le revêtement le plus efficace est une poudre compacte se dégradant en cours d'utilisation et réduisant l'adhérence de 37% par rapport à celle de l'aluminium non recouvert. En général, les revêtements diminuant l'adhérence possèdent une efficacité de courte durée et la détérioration est davantage causée par les déglacages que par le rayonnement UV.

De plus, il a été observé que l'adhérence de la glace est influencée par la rugosité du revêtement et est indépendante de l'hydrophobicité. La glace semble donc adhérer aux surfaces par un mécanisme mécanique incluant la théorie de la couche limite faible (*BLW*) mais il demeure impossible d'ignorer complètement le modèle d'adhérence chimique.



Caroline Laforte

étudiante



Jean-Louis Laforte

directeur de recherche

Remerciements

Premièrement, je tiens à remercier Monsieur Jean-Louis Laforte, D.Sc. A. professeur titulaire au département des sciences appliquées et responsable du LIMA pour avoir dirigé mes travaux de recherche et pour m'avoir fourni un support technique et moral. Je remercie également tout le personnel du LIMA pour sa coopération. Je remercie spécialement ma collègue et amie Caroline Blackburn pour avoir développé un appareil indispensable à mon étude.

De plus, je tiens à remercier Monsieur Daniel Gagnon, chercheur à l'IREQ (Institut de Recherche d'Hydro-Québec) qui a permis une collaboration précieuse à l'avancement du projet de recherche. Merci à Monsieur Stéphane Godin, technicien à L'IREQ, qui a bien voulu m'aider pendant mes courtes visites à l'institut de recherche.

Finalement, je remercie mes proches, ma sœur, mon jumeau et mon père pour avoir réussi à me faire sourire dans les moments les plus difficiles. Je remercie ma mère car elle m'a donné ma principale motivation et l'exemple d'une belle réussite. Je lui lève mon chapeau!

Tables des matières

RÉSUMÉ	II
REMERCIEMENTS.....	IV
TABLES DES MATIÈRES	V
LISTE DES SYMBOLES	X
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES TABLEAUX	XVI
LISTES DES ANNEXES	XVIII
1 INTRODUCTION.....	20
1.1 Problématique	20
1.2 Historique	22
1.2.1 Introduction	22
1.2.2 La glace et son adhérence.....	23
1.2.3 La mesure de l'adhérence de la glace	25
1.2.4 L'influence des conditions expérimentales lors de l'essai d'adhérence	26
1.2.5 L'adhérence solide-solide	27
1.2.6 L'adhérence glace-solide	30
1.2.7 Substances glaciophobes.....	32
1.3 Objectifs.....	33
1.3.1 Objectif principal	33
1.3.2 Objectifs spécifiques.....	33

1.4	Méthodologie	34
1.4.1	Introduction	34
1.4.2	Recherche et sélection des produits à caractère glaciophobe.....	34
1.4.3	Application des produits sur un support d'aluminium standardisé.	35
1.4.4	Caractérisation physico-chimique des revêtements étudiés.	35
1.4.5	Mesure de la masse de glace accumulée sur l'échantillons	35
1.4.6	Mesure d'adhérence sur les différents revêtements.....	36
1.4.7	Mesure de la taille des grains de la glace à l'interface	36
1.4.8	Mesure de l'adhérence de la glace sur des lames d'aluminium de différentes rugosités.	37
1.4.9	Mesure de l'adhérence de la glace après des cycles de glaçage/déglaçage. ...	37
1.4.10	Mesures du profil de surface et de l'angle de contact après un nombre de cycles glaçage/déglaçage.	37
1.4.11	Vieillissement accéléré des revêtements causé par exposition au rayonnement ultra-violet (UV).	38
2	APPAREILLAGE ET PROTOCOLES EXPERIMENTAUX	40
2.1	Introduction.....	40
2.2	Préparation des surfaces avant l'application du revêtement.....	40
2.2.1	Matériel	40
2.2.2	Procédures	41
2.3	Application des revêtements sur les lames d'aluminium	41
2.4	Mesure de l'épaisseur du revêtement	42
2.5	Caractérisation visuelle des surfaces des revêtements	42
2.5.1	Appareils	42
2.5.2	Procédures	43
2.6	Mesure de l'angle de contact.....	43
2.6.1	L'angle de contact.....	43
2.6.2	L'appareil	43
2.6.3	Procédures	45
2.6.4	Limitations	45

2.7 Mesures et calcul de l'énergie de surface du revêtement.....	46
2.7.1 L'énergie de surface et ses origines.....	46
2.7.2 Méthode de calcul de l'énergie de surface.....	47
2.7.3 Limites de l'approche Owens-Wendt	48
2.7.4 Procédures	49
2.8 Mesure du profil de surface	49
2.8.1 Le profil de surface	49
2.8.2 L'appareil	49
2.8.3 Procédures	50
2.9 Mesure de la masse de glace accumulée sur les échantillons inclinés.	50
2.9.1 Appareillage	50
2.9.2 Conditions expérimentales utilisée dans les essais d'accumulation.....	54
2.9.3 Procédures	55
2.10 Mesure de la densité de la glace	56
2.10.1 Matériel	56
2.10.2 Procédures	57
2.11 Mesure de l'adhérence de la glace	58
2.11.1 Matériel	58
2.11.2 Conditions expérimentales des essais d'adhérence	60
2.11.3 Procédures	61
2.12 Détermination de la taille des grains de la glace	63
2.12.1 Appareils	63
2.12.2 Procédures	63
2.13 Dégradation des revêtements pas rayonnement ultra-violet (UV)	64
2.13.1 Appareil.....	64
2.13.2 Procédures	65
3 LES REVÊTEMENTS ÉTUDIÉS	67
3.1 Introduction.....	67

3.2	Le revêtement A	68
3.3	Le revêtement D	70
3.4	Le revêtement H	72
3.5	Le revêtement L.....	74
3.6	Le revêtement P	76
3.7	Le revêtement S	78
3.8	Le revêtement W	80
3.9	L'aluminium	82
3.10	Classifications des revêtements.....	82
4	RÉSULTATS	84
4.1	Introduction.....	84
4.2	Masse de glace accumulée sur les échantillons inclinés.....	84
4.3	L'adhérence, l'hydrophobicité et la rugosité.....	89
4.3.1	Introduction	89
4.3.2	L'aluminium.....	90
4.3.3	Revêtement A	91
4.3.4	Le revêtement D	94
4.3.5	Le revêtement H	97
4.3.6	Le revêtement L.....	101
4.3.7	Le revêtement P	104
4.3.8	Le revêtement S	108

4.3.9	Le revêtement W.....	112
4.3.10	Analyse comparative des pourcentages de réduction de l'adhérence des revêtements.....	114
4.4	Dégradation par rayonnements UV.....	117
4.4.1	Introduction.....	117
4.4.2	Propriétés mesurées avant et après exposition aux UV.....	118
5	DISCUSSION.....	125
5.1	Introduction.....	125
5.2	L'adhérence de la glace aux revêtements.....	125
5.2.1	Comparaison des résultats obtenus avec ceux de la littérature.....	125
5.2.2	L'erreur sur la mesure d'adhérence.....	127
5.3	Les facteurs influençant l'adhérence.....	128
5.3.1	L'Hydrophobicité.....	128
5.3.2	La rugosité.....	132
5.3.3	La taille des grains.....	135
5.4	Le mécanisme d'adhérence de la glace proposé.....	139
6	CONCLUSION.....	145

Liste des symboles

A_{gl}	Aire de la glace	m^2
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>	
CRREL	<i>Cold Regions Research and Engineering Laboratory</i>	
d_g	Diamètre d'un cristal de glace	mm
$\overline{d_g}$	Diamètre moyen des cristaux de glace	mm
DMV	Taille des gouttes d'eau	μm
e_{gl}	Épaisseur de glace	m
G_{gl}	Module de Coulomb de la glace	Pa
γ	Énergie de surface	mJ/m^2
γ^l	Énergie de surface d'un liquide	mJ/m^2
γ^s	Énergie de surface d'un solide	mJ/m^2
γ^d	Composante dispersive de l'énergie de surface	mJ/m^2
γ^{nd} ou γ^p	Composante non-dispersive ou polaire de l'énergie de surface	mJ/m^2
γ^{sl}	Énergie d'interface solide-liquide	mJ/m^2
γ^{lv}	Énergie d'interface vapeur-liquide	mJ/m^2
γ^{sv}	Énergie d'interface vapeur-solide	mJ/m^2
IREQ	Institut de recherche d'Hydro-Québec	
LIMA	Laboratoire international des matériaux anti-givre	
LVDT	<i>Linear Voltage Differential Transformer</i>	

m_{fluide}	Masse de fluide	kg
m_g	Masse de glace	kg
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>	
P_1	Masse du fluide et du gobelet	kg
P_2	Masse du fluide, de la glace et du gobelet	kg
θ_c	Angle de contact	°
θ_e	Angle de contact d'équilibre	°
$\overline{\theta_e}$	Angle de contact d'équilibre moyen	°
R_a	Rugosité (moyenne arithmétique de la déviation du profil)	μm
$\overline{R_a}$	Rugosité moyenne	μm
r^2	Coefficient de corrélation linéaire	
ρ_{fluide}	Densité du fluide	
ρ_{glace}	Densité de la glace	
σ	Écart-type	
T	Température	°C
T_a	Température de l'air	°C
T_g	Température de transition vitreuse	°C
TÉFLON	Polytétrafluoroéthylène	
$\overline{\tau}$	Contrainte de cisaillement moyenne (adhérence moyenne)	MPa
U_a	Énergie d'adhérence	mJ/m^2
UQAC	Université du Québec à Chicoutimi	

UV	Ultra-violet	
v	Vitesse du vent	m/s
V	Volume	m^3
V_{gl}	Volume de glace	m^3
W	Teneur en eau liquide dans l'atmosphère	g/m^3
WBL	<i>Weak Boundary Layer</i> (couche limite faible)	
W_τ	Énergie élastique en cisaillement	J

Liste des figures

Figure 1.1: Type de glace en fonction des conditions météorologiques.....	24
Figure 2.1: Photographie de l'appareil de mesure d'angles de contact	44
Figure 2.2: Angle de contact	44
Figure 2.3 : Angle de contact et tension de surface.....	47
Figure 2.4 : Vue en plan de la chambre climatique	52
Figure 2.5 : Vue un coupe de la chambre 4m (distances en mm)	53
Figure 2.6 : Partie du système hydraulique de la chambre climatique 4m	54
Figure 2.7 : Montage pour la mesure de la quantité de glace accumulée	56
Figure 2.8 : Échantillons glacés avant le test d'adhérence	62
Figure 2.9 : Chambre à rayonnement UV	65
Figure 3.1 : Partie de la surface de l'échantillon recouverte du revêtement A	69
Figure 3.2 : Représentation du profil de surface d'un échantillon recouvert du revêtement A	69
Figure 3.3 : Partie de la surface de l'échantillon recouverte du revêtement D	71
Figure 3.4 : Représentation du profil de surface d'un échantillon recouvert du revêtement D	71
Figure 3.5 : Partie de la surface de l'échantillon recouverte du revêtement H	73
Figure 3.6 : Représentation du profil de surface d'un échantillon recouvert du revêtement H	73
Figure 3.7 : Partie de la surface de l'échantillon recouverte du revêtement L	75

Figure 3.8 : Représentation du profil de surface d'un échantillon recouvert du revêtement L	75
Figure 3.9 : Partie de la surface de l'échantillon recouverte du revêtement P	77
Figure 3.10 : Représentation du profil de surface d'un échantillon recouvert du revêtement P	77
Figure 3.11 : Partie de la surface de l'échantillon recouverte du revêtement S	79
Figure 3.12 : Représentation du profil de surface d'un échantillon recouvert du revêtement S	79
Figure 3.13 : Partie de la surface de l'échantillon recouverte du revêtement W	81
Figure 3.14 : Représentation du profil de surface d'un échantillon recouvert du revêtement W	81
Figure 3.15 : Classification des produits glaciophobes sélectionnés	82
Figure 4.1 : Glace accumulée sur des échantillons inclinés.....	87
Figure 4.2 : Adhérence de la glace au revêtement A	91
Figure 4.3: Angle de contact et rugosité du revêtement A	92
Figure 4.4 : Adhérence de la glace au revêtement D	94
Figure 4.5: Angle de contact et rugosité du revêtement D	95
Figure 4.6 : Adhérence de la glace au revêtement H	97
Figure 4.7: Angle de contact et rugosité du revêtement H	98
Figure 4.8 : Partie de la surface du produit H après 4 déglaçages	100
Figure 4.9 : Adhérence de la glace au revêtement L	101
Figure 4.10: Angle de contact et rugosité du revêtement L	102

Figure 4.11 : Partie de la surface du revêtement L après déglacages.....	103
Figure 4.12 : Adhérence de la glace au revêtement P	104
Figure 4.13: Angle de contact et rugosité du revêtement P	105
Figure 4.14 : Partie de la surface du revêtement P après 4 déglacages.....	107
Figure 4.15 : Adhérence de la glace au revêtement S	108
Figure 4.16: Angle de contact et rugosité du revêtement S	109
Figure 4.17 : Partie de la surface du revêtement S après 4 déglacages	111
Figure 4.18 : Adhérence de la glace au revêtement W	112
Figure 4.19: Angle de contact et rugosité du revêtement W	113
Figure 4.20 : W avant (à gauche) et après (à droite) expositions aux UV.....	120
Figure 4.21 : S avant (à gauche) et après (à droite) expositions aux UV	120
Figure 5.1 : Graphique de l'angle de contact et énergie de surface	129
Figure 5.2 : Graphique de la rugosité de différents produits	132
Figure 5.3 : Graphique des rugosités sur l'aluminium	134
Figure 5.4 : Graphique de la taille des grains.....	137
Figure 5.5 : Grains à la surface du produit W (à gauche) et D (à droite)	138

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Adhérence de la glace à différentes substances.....	22
Tableau 1.2 : Types de glace atmosphérique.....	24
Tableau 2.1 : Conditions expérimentales du givrage (tests d'accumulation).....	54
Tableau 2.2 : Conditions expérimentales du givrage (tests d'adhérence).....	60
Tableau 2.3 : Conditions expérimentales des tests d'adhérence.....	61
Tableau 3.1 : Caractéristiques initiales du revêtement A.....	68
Tableau 3.2 : Caractéristiques initiales du revêtement D.....	70
Tableau 3.3 : Caractéristiques initiales du revêtement H.....	72
Tableau 3.4 : Caractéristiques initiales du revêtement L.....	74
Tableau 3.5 : Caractéristiques initiales du revêtement P	76
Tableau 3.6 : Caractéristiques initiales du revêtement S	78
Tableau 3.7 : Caractéristiques initiales du revêtement W.....	80
Tableau 3.8 : Caractéristiques initiales de l'aluminium.....	82
Tableau 4.1 : Masse de glace accumulée sur des échantillons inclinés à 45°	85
Tableau 4.2 : Masse de glace accumulée sur des échantillons inclinés à 80° par rapport à l'horizontale.....	86
Tableau 4.3 : Valeur moyenne de l'adhérence de la glace sur l'aluminium	91
Tableau 4.4 : Caractéristiques moyennes du revêtement A	92
Tableau 4.5 : Caractéristiques moyennes du revêtement D	95

Tableau 4.6 : Caractéristiques moyennes du revêtement H	98
Tableau 4.7 : Caractéristiques moyennes du revêtement L	102
Tableau 4.8 : Caractéristiques moyennes du revêtement P	105
Tableau 4.9 : Caractéristiques moyennes du revêtement S	109
Tableau 4.10 : Caractéristiques moyennes du revêtement W	113
Tableau 4.11 : Analyse comparative des sept revêtements	115
Tableau 4.12 : Propriétés mesurées avant et après exposition aux UV	119
Tableau 5.1 : Résultats d'adhérence de différents auteurs	126

Listes des annexes

- Annexe 1 : Photographie de l'appareil mesurant l'adhérence de la glace
- Annexe 2 : Courbe de la température de l'échantillon durant le glaçage
- Annexe 3 : Fiche de résultats d'adhérence
- Annexe 4 : Calcul de l'énergie d'adhérence

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1 INTRODUCTION

1.1 Problématique

L'hiver, qui ne s'émerveille pas devant un arbre recouvert d'une belle couche de glace étincelante? Cette glace est d'une telle beauté que, quelquefois, on en oublie sa complexité et les nombreux problèmes qu'elle nous occasionne. Plusieurs secteurs d'activités peuvent être perturbés par les problèmes reliés à la surcharge des structures causée par l'accumulation de la glace : les télécommunications et les réseaux de transport électriques, maritimes, aériens et routiers. L'importance de ces réseaux pour l'être humain pose en première ligne l'importance d'étudier les divers phénomènes causés par la glace atmosphérique sous les formes de givre, de verglas, de gelée et de neige.

Diverses solutions existent aux problèmes causés par l'accumulation de glace. Par exemple, différentes méthodes de déglçage ont été développées (Laforte, J-L. et al., 1994). Les méthodes développées utilisent différentes formes d'énergie : mécanique, chimique, thermique. Dans bien des cas, ces méthodes s'avèrent efficaces mais consomment beaucoup d'énergie et/ou requièrent des infrastructures importantes. La solution miracle aux problèmes causés par l'accrétion de glace aux structures serait une substance sur laquelle la glace n'adhère pas. Donc, aucun dépôt de glace pour surcharger ou endommager les structures. Idéalement, cette substance serait solide, posséderait une efficacité permanente, serait peu dispendieuse et de plus, non toxique. Cette substance qui empêcherait la glace d'adhérer serait dite *glaciophobe*. Évidemment, cette substance n'est

encore que spéculations. C'est pour cette raison qu'on utilise l'expression : à *caractère glaciophobe* lorsqu'on décrit une substance qui diminue l'adhérence de la glace sans l'empêcher.

Pour la recherche et la sélection des produits dits glaciophobes on utilise différents critères. Le plus souvent cité est l'hypothèse où on assume qu'un produit possédant un fort caractère hydrophobe ou une faible affinité avec l'eau posséderait un caractère glaciophobe. D'autres facteurs comme l'élasticité, la conductivité thermique et le profil de surface sont également considérés. Cependant, les recherches effectuées à ce jour ne s'accordent pas sur le mécanisme d'adhérence de la glace aux surfaces et les principaux facteurs influençant l'adhérence. Or, ces connaissances sont nécessaires pour le développement d'une substance glaciophobe réellement efficace. Quelques lacunes sont responsables de ce désaccord.

Premièrement, les conditions expérimentales ne sont pas toujours adéquates et contrôlées de façon rigoureuse. Par exemple, l'état de la surface étudiée est souvent non mentionné et le type de glace étudié ne correspond pas à celui de la glace qu'on retrouve lors de réels phénomènes atmosphériques. Deuxièmement, les tests d'adhérence de la glace sur les différents substrats donnent des résultats présentant de fortes variations et ne sont souvent pas assez nombreux pour obtenir des valeurs d'adhérence significatives. De plus, les techniques utilisées pour la mesure de la force d'adhérence ne sont pas toujours adéquates. Cette recherche propose donc une étude exhaustive de l'adhérence de la glace sur des revêtements solides à caractère glaciophobe choisis parmi les produits disponibles

Cette recherche propose donc une étude exhaustive de l'adhérence de la glace sur des revêtements solides à caractère glaciophobe choisis parmi les produits disponibles commercialement en améliorant certains côtés expérimentaux et en utilisant une approche systématique du phénomène.

1.2 Historique

1.2.1 Introduction

Le phénomène de l'adhérence de la glace est un sujet traité depuis de nombreuses années. La force d'adhérence de la glace diffère selon son substrat. Le **Tableau 1.1** donne quelques valeurs d'adhérence de la glace à différents substrats publiées par Frieberg et Lacks (Frieberger et Lacks, 1961).

Tableau 1.1: Adhérence de l'eau qui se solidifie sur différentes substances

Catégories	Substances	Adhérence Pa x 10 ⁵
Métaux	Acier inoxydable	8,2
	Cuivre	8,9
	Aluminium	6,4
	Nickel	6,0
Bois	<i>Douglas Fir</i>	3,2
Polymères	Polyméthyle méthacrylate	2,9
	Époxy	5,7 à 9,3
	Teflon	4,3 à 5
	Silicones	2,9 à 6,8

Valeurs extraites (Frieberger, Lacks, 1961)

L'adhérence de la glace à une surface métallique est normalement plus élevée qu'à celle d'un polymère. Il est difficile de déterminer la valeur absolue de la force d'adhérence de la glace. En effet, dans la littérature, les valeurs d'adhérence peuvent varier facilement d'un facteur cent en passant d'un auteur à un autre. Ce grand écart entre les résultats est causé par la dépendance de l'adhérence de la glace à un très grand nombre de facteurs.

Enfin, le mécanisme selon lequel la glace adhère aux substances est encore mal connu. En général, les facteurs influençant l'adhérence liés aux propriétés de la glace et aux conditions expérimentales de mesures sont acceptés par tous les auteurs. Par contre, les facteurs se rattachant aux caractéristiques des surfaces varient selon le mécanisme d'adhérence proposé par les auteurs.

1.2.2 La glace et son adhérence

Les propriétés de la glace sont liées à sa microstructure qui est caractérisée par la taille et l'arrangement des grains de même que la grosseur et le nombre de pores. Ces derniers déterminent la densité et l'apparence de la glace. Ces deux grandes propriétés sont classées au **Tableau 1.2** selon les principaux types de glace atmosphérique rencontrés au niveau du sol. Ce **Tableau 1.2** présente également la terminologie anglaise couramment utilisée pour désigner les types de glace.

Tableau 1.2 : Types de glace atmosphérique

Type de glace	Apparence	Densité
Verglas (<i>Glaze</i>)	Glace dure et transparente Surface lisse	0,7 à 0,9
Givre dur (<i>Hard Rime</i>)	Glace dure, opaque ou translucide Surface lisse ou écaillée	0,5 à 0,9
Givre mou (<i>Soft Rime</i>)	Glace blanche , opaque Surface granuleuse ou en aiguille	Plus petite que 0,5

*(Laforte, J.-L., 2000)

La microstructure est fonction du contexte de formation de la glace. Ce contexte est défini par les paramètres météorologiques suivants : la température de l'air (T_a), la vitesse du vent (v), la taille des gouttes (DVM) et la teneur en eau liquide de l'atmosphère (W). La **Figure 1.1** illustre la relation entre la température de l'air (T_a), la vitesse du vent (v) et le type de glace.

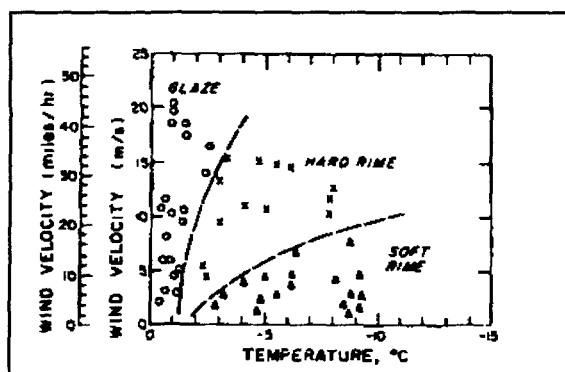


Figure 1.1: Type de glace en fonction des conditions météorologiques
(Kuroiwa, D, 1965)

Une augmentation de la température de formation a pour effet d'augmenter la densité de la glace. La force d'adhérence de la glace diminue lorsque diminue la densité. Cependant,

cette linéarité semble atteindre une limite à faible température de formation ou à moins de 0,5 de densité (Michel, B., 1978).

1.2.3 La mesure de l'adhérence de la glace

Il existe différentes façons de mesurer l'adhérence de la glace. Pour la grande majorité des auteurs, l'essai d'adhérence consiste à exercer une force soit en tension ou en compression, produisant un cisaillement sur la glace prise en sandwich entre deux substrats. Le laboratoire de recherche CRREL, *Cold Regions Research Engineering Laboratory*, utilise ce type de méthode. Le spécimen de glace peut prendre une forme cylindrique (Jellinek, H.H.G., 1959) ou une forme rectangulaire (Landy, M., Freiburger, A., 1967). Également, la force de cisaillement peut être appliquée en torsion (Croutch, V.K., Hartley, R.A., 1992). L'échantillon de glace est obtenu en faisant geler sur le substrat un volume d'eau donné. Cette façon de faire permet toutefois d'obtenir un seul type de glace qui ne représente pas la glace retrouvée dans la nature formée par l'accrétion de gouttelettes d'eau.

Deux autres types d'essais moins courants ont été développés. Le premier utilise la force centripète mesurée lors du décollement de la glace (Stallabrass, J.R., Price, R.D., 1962). Le second type d'essai, le *peel test* consiste à mesurer la force de décollement d'une couche de glace sur un plastique détachée à l'aide d'un levier d'acier inoxydable ou d'aluminium (Scavuzzo, R., Chu, M., 1995).

Finalement, une nouvelle méthode a été développée récemment au Laboratoire des matériaux anti-givre (LIMA) pour mesurer l'adhérence d'une couche de glace à des matériaux à faible adhérence. Sommairement, elle consiste en la mesure du cisaillement à l'interface glace-substrat lors de la flexion d'une lame métallique recouverte ou non d'un revêtement sur lequel la glace adhère (Blackburn, C., et al., 2000). Les deux grands avantages de cette méthode sont que le revêtement peut être appliqué sur la lame comme une peinture et que la glace est formée à partir de gouttelettes surfondues générées en chambre climatique. Les conditions expérimentales simulées sont donc plus proches de celles des précipitations verglaçantes rencontrées dans la nature. Cette dernière méthode sera celle utilisée dans cette présente recherche.

1.2.4 L'influence des conditions expérimentales lors de l'essai d'adhérence

La force avec laquelle la glace adhère aux surfaces est tributaire des nombreux facteurs expérimentaux. C'est pourquoi, lors d'une étude comparative de force d'adhérence sur différents matériaux, il est primordial de contrôler le plus de facteurs expérimentaux possibles et d'en connaître leurs influences. Les principaux facteurs en jeu lors de l'essai d'adhérence sont décrits ci après.

1) La température de la glace

La force d'adhérence d'un morceau de glace pris entre deux morceaux d'acier inoxydable varie linéairement avec la diminution de la température (Jellinek, H.H.G.,1959). Cette

linéarité comporte une limite qui est atteinte lorsque la valeur où la force d'adhérence devient plus grande que la force de cohésion de la glace (Jellinek, H.H.G., 1962).

2) Le taux de déformation

La valeur d'adhérence de la glace peut varier avec le taux de déformation imposé lors de l'essai d'adhérence. Par exemple, Jellinek (Jellinek, H.H.G., 1962) démontre que lors des essais d'adhérence en tension effectués dans un intervalle de 0 à 0,04 cm/s, la force d'adhérence sur l'acier augmente linéairement avec une augmentation de la vitesse de déformation.

3) La glace et la préparation de la surface du substrat

La mode de formation de l'échantillon de glace peut varier avec la technique employée pour mesurer son adhérence. Lorsque la glace est formée d'eau gelée en bloc, les paramètres à considérer sont : la qualité de l'eau utilisée, la vitesse de refroidissement, l'âge du lien glace-substrat. Lorsque la glace est obtenue par précipitations verglaçantes, on ajoute à ces derniers facteurs : la température de la glace qui dépendent des températures de l'air, de l'eau et du substrat, la vitesse du vent, la grosseur des gouttes et la teneur en eau liquide.

1.2.5 L'adhérence solide-solide

L'adhérence de la glace sur un substrat solide constitue une adhérence de type solide-solide. Dans la littérature, on fait mention de cinq principales théories pour expliquer le mécanisme de l'adhérence d'un solide à un autre solide (Landrock, A., 1985). Les voici :

1) Théorie mécanique

Un substrat possédant une rugosité macroscopique fournit des crochets mécaniques à l'adhérent tout en augmentant la surface de contact. Donc, l'augmentation de la rugosité cause une augmentation de l'adhérence. Cependant, lorsque les deux surfaces solides possèdent moins d'affinité et que la rugosité augmente, des aires non recouvertes se développent à l'interface et peuvent causer une diminution d'adhérence. La rugosité est le principal facteur faisant varier la force d'adhérence à une interface solide-solide.

2) Théorie de l'adsorption physique ou chimique

Les molécules de l'adhérent et celle du substrat sont reliées ensembles par des forces d'attraction chimiques variées. C'est le phénomène d'adsorption physique due aux forces de van der Waal. Cependant, dans certains cas, des liens primaires (ioniques ou covalents) et des ponts hydrogènes sont impliqués. On parlera alors de chimisorption. Cette théorie assume une interface définie et un bon contact. Pour qu'il y ait adsorption ou chimisorption, les deux substances doivent posséder une bonne affinité chimique. Meilleure est l'affinité chimique entre deux substances, plus grande est la quantité et la qualité des liens entre eux, donc plus grande est l'adhérence. La mouillabilité entre les substances, qui est mesurée par l'angle de contact, θ_c , est une mesure du degré de leur affinité. Dans le cas précis de l'eau, une substance possédant peu d'affinité avec l'eau, angle élevé, est dite hydrophobe alors que celle y présentant beaucoup d'affinité, angle faible, sera qualifiée d'hydrophile.

3) Théorie de diffusion

L'adhérence est produite par la diffusion des molécules d'un solide dans l'autre substrat, ce qui provoque une élimination de l'interface. Les molécules des deux solides en cause doivent être mutuellement solubles et doivent posséder une mobilité de chaîne suffisante. L'adhérence augmente avec la période de contact, la température, la pression et décroît avec le poids moléculaire.

4) Théorie électrostatique

L'adhérence est due aux forces de liaison électrostatiques provenant du transfert d'électrons entre les molécules de deux solides à l'interface. Cette théorie est supportée par l'observation de parties chargées lors du bris d'adhérence.

5) Théorie de la couche limite faible (*Weak-Boundary Layer* , *WBL*)

Cette théorie s'accorde sur le fait que la fracture ne se produit pratiquement jamais à la position de l'interface mais dans une couche de faible épaisseur à l'intérieur du solide le moins cohésif. La couche limite faible peut prendre place dans l'adhérent ou l'adhésif si des molécules étrangères ou impuretés qui peuvent être simplement de l'air sont présentes près de l'interface.

1.2.6 L'adhérence glace-solide

La connaissance des différents mécanismes d'adhérence solide-solide n'est pas suffisante pour réussir à expliquer le phénomène de l'adhérence de la glace à un substrat solide. L'eau possède en effet un comportement unique. Premièrement, elle est une des quelques rares substances à se dilater lors de la solidification. De plus, l'eau est souvent qualifiée de solvant universel en raison de sa grande capacité à interagir chimiquement avec plusieurs types de substances.

Il existe quatre mécanismes pouvant expliquer l'adhérence de la glace :

- Mécanique

La glace adhère aux surfaces par effet d'ancrage dans les aspérités en surface du substrat. L'adhérence de la glace augmente avec la rugosité de la surface. En effet, l'augmentation de la rugosité augmente le nombre de sites d'ancrage possible. C'est la conclusion à laquelle arrive Saito (Saito, 1997). Cependant, selon ce même auteur, en présence de très fortes rugosités, l'adhérence de la glace diminuerait. Cette diminution serait en effet causée par l'augmentation de bulles d'air à l'interface glace/revêtement. Les caractéristiques viscoélastiques du substrat pourraient également influencer l'adhérence mécanique de la glace (Andrews, H. A., et al., 1984). L'adhérence de la glace diminuant sur un substrat flexible (Landy, M., 1967).

- Chimique

L'adhérence de la glace est attribuable aux forces des liens intermoléculaires de van der Waals. À l'interface glace/substrat on retrouverait des liens dispersifs de London et dans certains cas, des liens hydrogènes (Croucht, V. K., Hartley, R. A., 1992). Pour étudier l'effet de la présence des liens intermoléculaires à l'interface glace/substrat, on mesure la tension de surface du substrat ou l'angle de contact de l'eau sur celui-ci (mouillabilité). Lorsque l'angle de contact de l'eau sur le substrat augmente, sa mouillabilité et son affinité chimique avec l'eau diminue, occasionnant une diminution de l'adhérence de la glace (Adersson, L., et al., 1994). Également, plus la tension de surface d'un substrat est basse, moins l'eau le mouille et moins la glace adhère à celui-ci (Yoshida, M., et al., 1991).

- Électrostatique

L'adhérence de la glace est attribuable aux forces électrostatiques à l'interface entre les molécules de la glace et du substrat. Ce modèle expliquerait la dépendance de l'adhérence de la glace à la température (Petrenko, V. K., 1997).

- Couche limite faible (WBL)

Ce modèle se rapproche du modèle mécanique et expliquerait le mécanisme de rupture. Cette dernière se produit à l'intérieur de la couche limite présente à l'interface glace/substrat. La rupture entre la glace et le substrat proviendrait plutôt d'imperfections du réseau, de fissures et d'autres imperfections (Lliboutry, 1964). Dans plusieurs cas de rupture de la glace, on observe une mince couche de glace à la surface du substrat (Minsk, L. D., 1982). La rupture serait donc plutôt cohésive qu'adhésive.

1.2.7 Substances glaciophobes

Les substrats étudiés et cités dans la littérature sont trop nombreux pour en faire une liste exhaustive. De façon générale, la recherche d'une substance à caractère glaciophobe s'effectue parmi la panoplie de polymères possédant une faible énergie de surface. Pour cette raison, les polymères de type fluorés comme les TÉFLONS et ceux possédant des composés de silicium sont les deux types de polymère les plus étudiés. En 1963, les auteurs Porte et Nappier (Porte, H. A., Nappier, T. E., 1963) affirment que ces deux types de polymères constituent les substances les plus prometteuses pour réduire l'adhérence de la glace. Aucune de ces études n'aboutit sur la découverte d'une substance réellement glaciophobe. Par exemple, en 1975, Artis (Artis, D. R., 1975) étudie la possibilité d'utiliser un revêtement glaciophobe sur les hélicoptères de l'armée américaine. Il conclut, dans son rapport, qu'aucun des revêtements étudiés ne possède les qualités glaciophobes nécessaires. Plus récemment, Anderson et Reich (Anderson, N. A., Reich, A. D., 1997) étudient la performance de différents revêtements à faible énergie de surface retenus à la NASA et chez *BFGoodrich*. Aucun des revêtements étudiés ne se révèle glaciophobe. Le plus efficace réduit d'un facteur 2 l'adhérence de la glace à l'aluminium. Également, un rapport préparé pour le département des transports des États-Unis (Westmark, P., et al., 1997) et un rapport de l'Electricity Power Research Institute, EPRI, (Baum, B., et al., 1996) arrivent à une conclusion semblable. Cette conclusion est à l'effet que certaines substances tendent à réduire l'adhérence de la glace mais qu'elles ne possèdent pas toutes les qualités requises pour une utilisation à grande échelle. Malheureusement, les substances avec un effet glaciophobe élevé possèdent peu de durabilité et vis-versa.

1.3 Objectifs

1.3.1 Objectif principal

L'objectif principal du mémoire est de comparer la performance à réduire l'adhérence de la glace sur différentes substances commercialement disponibles possédant un caractère glaciophobe.

1.3.2 Objectifs spécifiques

- Étudier la quantité de glace accumulée sur des surfaces inclinées recouvertes de substance glaciophobe.
- Déterminer l'adhérence de la glace en fonction de l'hydrophobicité du revêtement glaciophobe.
- Déterminer l'adhérence de la glace en fonction du profil de surface du revêtement glaciophobe.
- Étudier l'effet du vieillissement des substances par rayonnement UV et par déglaçages successifs sur l'adhérence de la glace.
- Proposer un mécanisme par lequel à l'eau qui se solidifie adhère aux surfaces.

1.4 Méthodologie

1.4.1 Introduction

Pour répondre aux objectifs de ce travail, il est nécessaire de mesurer l'adhérence de la glace avec la plus grande précision possible. L'étude de l'adhérence de la glace est principalement comparative dans le sens où les performances à réduire l'adhérence des revêtements sont comparées entre elles. Pour avoir le moins de fluctuation dans les résultats, les conditions expérimentales tel la température, l'intensité du givrage et la vitesse de déformation doivent être contrôlées avec rigueur lors des essais. Le travail expérimental effectué dans cette étude peut se diviser en trois grandes parties. La première partie a consisté à déterminer l'effet des revêtements sur la quantité de glace accumulée lors de précipitations glaçantes. La deuxième partie a consisté à la détermination par comparaison du pourcentage de réduction de l'adhérence de la glace mesurée sur les revêtements. Enfin, la dernière partie est consacrée à l'étude de l'effet du vieillissement de chaque revêtement sur la permanence de la réduction de l'adhérence de la glace.

1.4.2 Recherche et sélection des produits à caractère glaciophobe.

La recherche a été d'abord effectuée en visitant les sites web de manufacturiers de produits commerciaux. Les principaux critères de sélection sont : l'hydrophobicité et/ou le caractère glaciophobe, la disponibilité commerciale, la facilité d'application sur l'aluminium, la résistance et la permanence. Sept produits différents ont été sélectionnés. L'achat est effectuée avec l'aide du service d'approvisionnement de l'université du Québec à

Chicoutimi (UQAC). Il est à noter que le TÉFLON n'a pas été sélectionné pour l'étude car il est difficile d'en appliquer une fine couche sur l'aluminium et il a déjà été étudié à maintes reprises.

1.4.3 Application des produits sur un support d'aluminium standardisé.

Les produits sont tous appliqués sur la surface d'une lame d'aluminium préalablement nettoyée et désoxydée. **Pour toutes les expérimentations de cette étude, les lames d'aluminium (25.41 mm * 4.85 mm * 330 mm) recouvertes de revêtement seront nommées : « échantillons ».** Chaque échantillon est identifié à l'aide d'un numéro servant à le fichier selon la nature du revêtement ainsi que son épaisseur. Ces échantillons sont utilisés pour les différentes mesures effectués pour la caractérisation physico-chimique des revêtements et la performance à réduire l'adhérence.

1.4.4 Caractérisation physico-chimique des revêtements étudiés.

Cette caractérisation a consisté à déterminer la tension de surface et le profil de surface de chaque produit ainsi qu'à en noter l'apparence, la texture et la couleur.

1.4.5 Mesure de la masse de glace accumulée sur l'échantillons

Cette série d'essais a pour but de déterminer l'effet du caractère glaciophobe sur la quantité de glace accumulée. L'accumulation de la glace est produite en exposant les surfaces

inclinées à 45 et 80° à des précipitations de bruine verglaçante. Les masses de glace sur les échantillons sont pesées et comparées à celle accumulée sur l'aluminium non recouvert. Pour diminuer l'erreur causée par l'inégalité des précipitations, le test est répété trois fois.

1.4.6 Mesure d'adhérence sur les différents revêtements.

Les mesures d'adhérence sont effectuées avec les échantillons qui ont été préalablement exposés à des précipitations de bruine verglaçante afin d'obtenir une couche d'environ 13 mm. Les conditions expérimentales sont maintenues constantes pour permettre une comparaison adéquate des valeurs d'adhérence de la glace sur les produits. Chaque produit est testé avec cinq échantillons. Les résultats ainsi obtenus sont comparés à ceux d'un échantillon d'aluminium non recouvert afin de déterminer le coefficient de réduction de l'adhérence de la glace de chaque revêtement à caractère glaciophobe. Ce coefficient est également comparé aux différentes caractéristiques physico-chimiques des revêtements pour étudier leurs influences.

1.4.7 Mesure de la taille des grains de la glace à l'interface

Après différents tests d'adhérence, le morceau de glace décollée est photographiée du côté de la surface adhérente à l'échantillon. La taille moyenne des grains est déterminée directement sur les photos. Les valeurs obtenues seront comparées aux valeurs d'adhérence de la glace et aux caractéristiques des revêtements étudiés.

1.4.8 Mesure de l'adhérence de la glace sur des lames d'aluminium de différentes rugosités.

L'adhérence a été mesurée sur quatre lames d'aluminium de rugosité (R_a) variant de 0,08 à 1,0 μm pour étudier l'effet de l'augmentation de la rugosité microscopique sur l'adhérence de la glace.

1.4.9 Mesure de l'adhérence de la glace après des cycles de glaçage/déglaçage.

Le même échantillon est glacé et déglacé huit fois pour permettre de connaître l'influence du déglacage sur sa capacité à réduire l'adhérence de la glace.

1.4.10 Mesures du profil de surface et de l'angle de contact après un nombre de cycles glaçage/déglaçage.

Après chaque deux cycles de glaçage/déglaçage le profil de surface et l'angle de contact sont mesurés. Les courbes de la rugosité et de l'hydrophobicité en fonction du nombre de déglacages sont comparées à celle de l'adhérence de la glace pour faire ressortir le degré d'influence de ces deux paramètres sur l'adhérence.

1.4.11 Vieillissement accéléré des revêtements causé par exposition au rayonnement ultra-violet (UV).

Les caractéristiques des revêtements avant et après une exposition au rayonnement UV sont comparées pour voir comment le coefficient de réduction de l'adhérence de la glace varie avec le temps d'utilisation.

CHAPITRE 2

APPAREILLAGE ET PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX

2 APPAREILLAGE ET PROTOCOLES EXPERIMENTAUX

2.1 Introduction

Les nombreuses expérimentations de ce travail ont été effectuées avec les appareils du LIMA et de l'Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ) dont le personnel technique a été également mis à contribution. Ce chapitre présente une description complète de l'appareillage, des protocoles et des conditions expérimentales utilisées.

2.2 Préparation des surfaces avant l'application du revêtement

2.2.1 Matériel

- Acétone
- Acide sulfurique concentrée (1.84 g/mL)
- Eau distillée
- Dichromate de sodium, $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
- Grand plat de pyrex de forme rectangulaire
- Béchers
- Thermomètre
- Plaque chauffante
- Four
- Balance analytique

2.2.2 Procédures

Les surfaces des lames d'aluminium de nuance 6061 T6 sont d'abord légèrement polies au papier avant d'être traitées chimiquement pour maximiser l'adhérence du revêtement sur l'aluminium. Ce traitement est effectué dans une solution d'acide sulfurique contenant du dichromate de sodium (Landrock, A. H., 1995).

La technique consiste en premier lieu à dégraisser les lames avec un solvant approprié (l'acétone peut être utilisée pour enlever grossièrement les contaminants; les vapeurs de perchloroéthylène sont bonnes pour dégraisser). Il suffit de les immerger ensuite pendant 10 minutes dans une solution à 68 °C de : 30 parties poids d'eau, 10 parties poids d'acide sulfurique concentré et 1 partie par poids de chromate de sodium. À la sortie du bain, les rincer avec de l'eau distillée qui ne dépasse pas la température de 65,5 °C. Sécher à l'air libre à une température ne dépassant pas 65,5 °C. La surface est prête à l'application des revêtements pour les prochains 48 hr.

2.3 Application des revêtements sur les lames d'aluminium

Dans les 48 h qui suivent la préparation de surface, les lames sont numérotées à l'aide d'un poinçon métallique et recouvertes d'un revêtement à caractère glaciophobe. Pour chaque produit, dix lames ont été préparées de façon identique et fichées à l'aide de leur numéro. La plupart des produits vendus sont prêts pour l'application mais quelques-uns demandent de mélanger deux ou trois composants dans des proportions pré-définies. La description des

produits sélectionnés ainsi que le protocole de pré-application des produits sera détaillé dans le chapitre 3. L'application du produit est effectuée à l'aide d'un fusil à peinture (*Mc Nulty, deluxe medium-duty, FR-107, 2.0 mm de diamètre*) opéré à une pression de 58 lbs/po². Pour l'application, les lames sont simplement déposées à plat et exposées au jet du fusil. Ce dernier est tenu à une distance d'environ 30 cm de la lame. Le temps de séchage du revêtement sur les lames est au minimum d'une semaine.

2.4 Mesure de l'épaisseur du revêtement

L'épaisseur de la couche de produit déposée sur la lame a été déterminée à l'aide d'un pied à coulisse électronique (*Digimatic, Mitutoyo, Model : CD-8'*). On a en effet mesuré l'épaisseur de la lame avant et après l'application du substrat. L'épaisseur moyenne initiale est soustraite de l'épaisseur moyenne finale.

2.5 Caractérisation visuelle des surfaces des revêtements

2.5.1 Appareils

- Appareil photo: *Polaroid MP4+, Instant Camera System*
- Film: *Polacolar 59, (4x5) po², ISO 80/20⁰*
- Lampes

2.5.2 Procédures

Les surfaces des revêtements sont photographiées de façon à mettre en évidence la texture macroscopique. Un étalon de 1 mm a été déposé sur la surface pour connaître précisément le grossissement de la photo.

2.6 Mesure de l'angle de contact

2.6.1 L'angle de contact

L'angle de contact (θ_c) que fait un liquide sur un solide est un indice du degré d'affinité qui existe entre eux. Lorsque l'affinité chimique est élevée, le liquide ne sera pas repoussé par le solide. Il aura alors tendance à s'aplatir sur le solide, donc à le mouiller. Une substance facilement mouillable par l'eau est appelée hydrophile tandis qu'une substance difficilement mouillable qui a peu d'affinité avec l'eau est dite hydrophobe. L'hydrophobicité se traduit donc par une augmentation de l'angle de contact de l'eau sur la surface étudiée. Plus l'angle de contact est élevé, plus la surface est hydrophobe. Ce dernier paramètre va être étudié en relation avec la force d'adhérence de la glace.

2.6.2 L'appareil

- Module principal: *VCA Optima de AST Product*
- Logiciel: *VCA version 1.71 for Windows 95, AutoFast version 2.33*

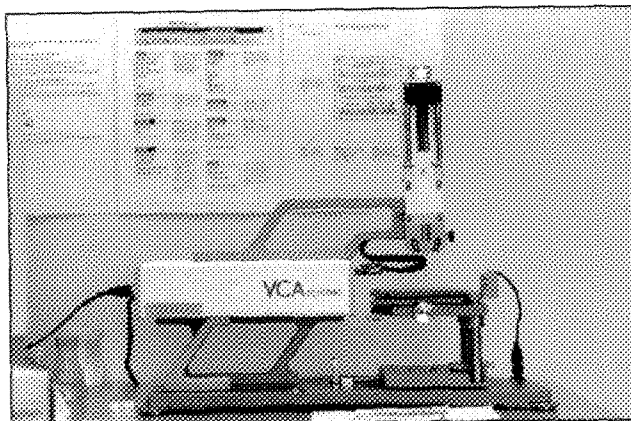


Figure 2.1: Photographie de l'appareil de mesure d'angles de contact

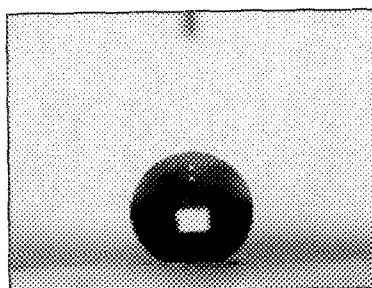


Figure 2.2: Angle de contact

L'appareil utilisé (**Figure 2.1**) est spécialement conçu pour mesurer les angles de contact statiques d'une goutte de liquide sur un substrat solide. Il est principalement composé d'une seringue micrométrique, d'une caméra vidéo grossissante couplée à un ordinateur et/ou d'un moniteur. L'image vidéo est arrêtée sur un plan de la goutte sur la surface (**Figure 2.2**). Un logiciel de traitement d'image est fourni pour déterminer l'angle de contact.

2.6.3 Procédures

Il existe différentes façons de mesurer l'angle de contact d'un liquide sur un solide. Celle sélectionnée pour ce travail est la méthode la plus simple et la plus fréquente. La méthode consiste au dépôt à l'aide d'une seringue graduée d'une goutte de liquide sur un substrat solide. La mesure de l'angle est effectuée de façon statique. Pour chaque solide, l'angle a été mesuré à cinq endroits aléatoires sur le même échantillon avec des gouttes de tailles variant de 2 à 3 μL pour obtenir une moyenne significative. Pour la même goutte, dix mesures d'angle ont été prises afin de déterminer l'écart type qui correspond à l'erreur systématique sur la mesure. La précision ainsi obtenue pour l'angle de contact est de $\pm 2^\circ$.

2.6.4 Limitations

Cette méthode possède des limitations. L'angle de contact doit être mesuré sur des surfaces solides, lisses et homogènes. Donc, la méthode ne s'applique pas aux produits poudreux, qui demandent une technique spécialement conçue pour leurs études (Pépin, X., et al., 1998). La rugosité de la surface affecte également l'angle de contact réel à la surface, θ_c (Neumann, A. W., 1996). Lorsque le mouillage est bon (θ_c plus faible que 90°), l'augmentation de la rugosité aura pour effet de diminuer l'angle de contact. Lorsque le mouillage est faible (θ_c plus élevé que 90°), l'angle de contact sera augmenté. Les surfaces étudiées possédant toutes une rugosité, l'angle observé sera celui pour lequel le liquide et le solide seront en équilibre. Cet angle est appelé angle de contact à l'équilibre, θ_e .

2.7 Mesures et calcul de l'énergie de surface du revêtement

2.7.1 L'énergie de surface et ses origines

L'énergie de surface d'une substance est une caractéristique importante lors de phénomène d'interface comme celui de l'adhérence. L'énergie de surface, γ , (appelée tension superficielle pour les liquides), correspond à l'énergie nécessaire pour faire augmenter l'aire de la surface d'un matériau d'une quantité unitaire et ce, de manière réversible et dans des conditions isothermes. L'origine de cette énergie est l'attraction anisotrope des molécules voisines sur une molécule de surface d'un matériau. La molécule de surface possède donc un surplus d'énergie et une attraction vers le centre du matériau.

L'énergie d'une molécule de surface d'un matériau est due aux interactions intermoléculaires. Il existe trois principaux types d'interactions intermoléculaires. Le premier type implique les interactions de van der Waals. Ces interactions agissent sur de longues distances entre dipôles induits ou permanents des molécules. Le deuxième type d'interactions appelées : acide/base. Ce sont des interactions donneur-accepteur au sens Lewis basé sur le partage d'un doublet électronique. Le dernier type est la liaison hydrogène qui consiste au partage d'un doublet avec un atome d'hydrogène disponible. L'énergie en cause lors de ces types d'interaction est variée de 2 à 40 kJ/mol.

2.7.2 Méthode de calcul de l'énergie de surface

L'énergie de surface de matériaux polymériques se calcule à partir des valeurs d'angle de contact. Il existe plusieurs méthodes permettant de calculer l'énergie de surface. L'équation de base pour la majorité de ces méthodes de calcul est celle de Young (**Équation 2.1**) décrivant la relation entre l'angle de contact et l'énergie de surface où les composantes sont illustrées dans la **Figure 2.3**.

$$\text{Équation 2.1 : } \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cos \theta_c = \gamma_{sv}$$

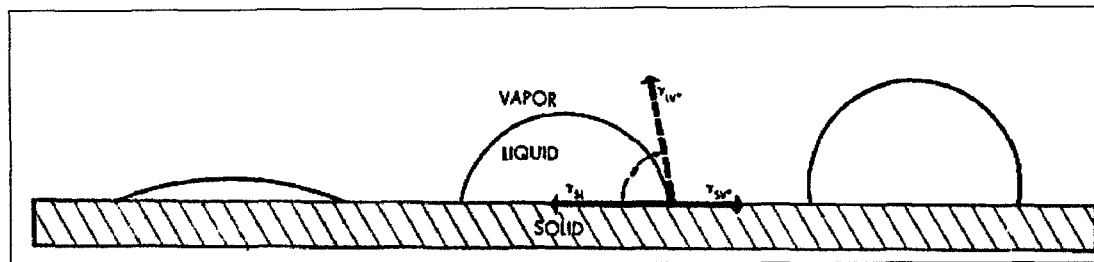


Figure 2.3 : Angle de contact et tension de surface

Fowkes (Lanet, V., Gandini, A.) décrit la tension de surface comme étant la somme de deux types d'interactions cohésives : γ^d , dispersives et γ^{nd} (γ^p), non dispersives ou polaires par l'**Équation 2.2**.

$$\text{Équation 2.2 : } \gamma = \gamma^d + \gamma^{nd}$$

La méthode utilisée dans ce travail pour le calcul de l'énergie de surface est une combinaison de celles de Young et Fowkes et elle se nomme Owens-Wendt. Cette méthode utilise l'hypothèse de la moyenne géométrique des forces à l'interface. À partir d'angles de contact d'au moins deux liquides dont les composantes γ^p et γ^d sont connues, on trace le graphique répondant à l'Équation 2.3. La tension de surface du solide est obtenue par la somme des carrés la pente au carré et l'intercepte avec :

$$\text{Équation 2.3 : } \frac{\gamma_l(1+\cos\theta_e)}{2\sqrt{\gamma_l^d}} \text{ vs. } \sqrt{\frac{\gamma_l^p}{\gamma_l^d}}$$

Où la pente de la régression linéaire est égale à $\sqrt{\gamma_s^p}$, et l'intercepte, à $\sqrt{\gamma_s^d}$.

2.7.3 Limites de l'approche Owens-Wendt

L'approche Owens-Wendt est une estimation graphique de l'énergie de surface où le coefficient de corrélation linéaire (r^2) de la régression devient un indice de la précision de celle-ci. Les points du graphique correspondent à la mesure d'angle de contact. Donc, l'approche comporte les mêmes limitations que l'erreur associée à la mesure de l'angle de contact citée dans la section 2.6.4.

2.7.4 Procédures

L'angle de contact, θ_e , est mesuré selon la méthode décrite dans la section 2.6. Quatre liquides ont été utilisés : l'eau déionisée, le diiodométhane, le formamide et l'éthylène glycol. Pour valider la méthode, la tension de surface d'un morceau de TÉFLON lisse a été déterminée. Le résultat obtenu s'écartant de moins de 5% d'avec les résultats provenant de la littérature, la méthode a été retenue pour le calcul des énergies de surface.

2.8 Mesure du profil de surface

2.8.1 Le profil de surface

Le profil de surface est exprimé en terme de rugosité avec l'expression R_a . Ce terme se définit comme étant la moyenne arithmétique de la déviation du profil.(UBM *corporation, operator manuel*).

2.8.2 L'appareil

- Module principal : *UBM Company, type :2025, No=92 M001*
- Logiciel: *UBSOFT, version 1.9*

L'appareil utilisé est un profilomètre, utilisant un laser couplé à un système de lentilles optiques, ne nécessitant aucun contact physique avec la surface étudiée. Il détecte les changements optiques provoqués par la différence de distance entre la source et la surface

et trace le profil en 2 ou 3 dimensions. D'après les points du profil, différents facteurs exprimant la rugosité sont calculés comme R_a .

2.8.3 Procédures

La rugosité d'un revêtement est calculée en moyennant les valeurs de rugosités mesurée à partir de deux échantillons. Pour chacun de ces échantillons, la rugosité est mesurée et calculée sur trois zones aléatoires de 3 mm par 3 mm pour permettre un bon échantillonnage de la surface du revêtement. Pour déterminer l'erreur sur la mesure de rugosité, le profil de la même zone a été mesuré et sa rugosité, calculée à trois reprises. La zone a été sélectionnée sur un échantillon rugueux afin de calculer une erreur représentative. L'écart type des trois valeurs de R_a ainsi obtenues est de 0,3 μm .

2.9 Mesure de la masse de glace accumulée sur les échantillons inclinés.

2.9.1 Appareillage

- Balance précise à 0,01 g
- Montage avec supports d'échantillons inclinés
- Échantillons sur lesquels on a collé un aimant
- Chambre climatique 4 m

La chambre climatique utilisée est celle du LIMA. Il s'agit d'une chambre froide de 4 mètres de hauteur utilisée pour les simulations expérimentales de précipitations verglaçante avec des gouttelettes de diamètre volumique médian, **DMV**, de l'ordre de 200 μm .

La chambre est schématisée dans la **Figure 2.4**. Une fenêtre, munie d'un double vitrage pour prévenir la condensation, permet d'observer de l'extérieur les tests effectués dans la chambre. Un panneau sépare la chambre en deux parties : la section d'essai où se situe le montage et la section utilisée pour les manipulations complémentaires comme la pesée des échantillons. Cette séparation permet également de garder le mouvement de l'air constant et uniforme dans la zone de glaçage. Des ventilateurs placés au-dessus d'un plafond perforé, fait circuler l'air froid dans la section d'essai à une vitesse de 2 m/s. La température de la chambre climatique est contrôlée à $\pm 0,5$ °C par un ordinateur dans l'intervalle de température comprise entre 0 et -30 °C.

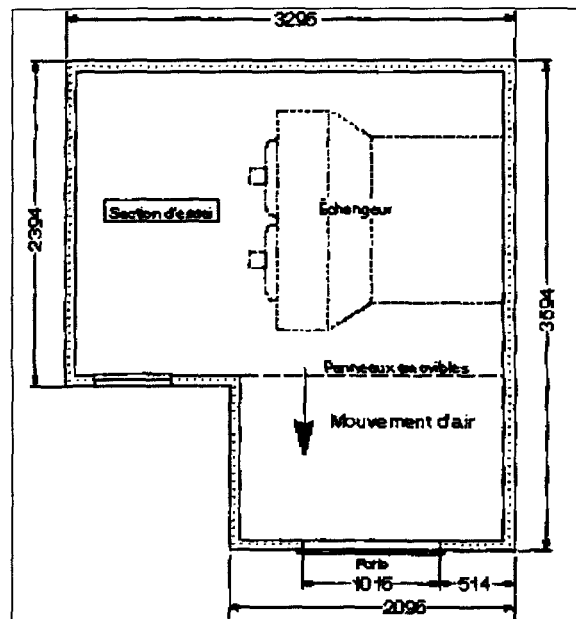


Figure 2.4 : Vue en plan de la chambre climatique

- Générateur de précipitation

Le type de précipitation simulée est de la bruine verglaçante formée de gouttelettes de **DMV** d'environ 200 μm générées par un système hydraulique alimenté par un réservoir d'eau pressurisée. Le dépôt de givre est obtenu à partir de la congélation des gouttelettes d'eau surfondues pulvérisées à l'aide d'un gicleur hydraulique placé à environ 130 cm au-dessus des lames (**Figure 2.5**).

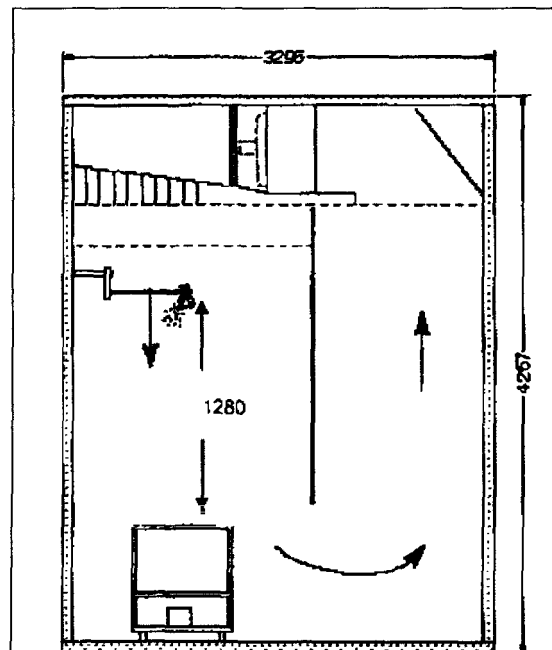


Figure 2.5 : Vue un coupe de la chambre 4m (distances en mm)

L'angle d'oscillation du gicleur est de 55° (**Figure 2.6**). La période d'oscillation du système est un paramètre contrôlable. L'embout du gicleur est interchangeable et détermine la taille des gouttes ainsi que l'étendu du jet. Également, un système pulsatif permet de contrôler la quantité d'eau sortant du gicleur. Pour ce faire, un temps *ON* (lorsque l'eau sort) et un temps *OFF* (lorsque l'eau ne sort pas) sont fixés. Pour éviter le gel dans le conduit, un élément chauffant de type *résistance électrique* maintient au-dessus de 0°C les conduits amenant l'eau du réservoir jusqu'au gicleur.

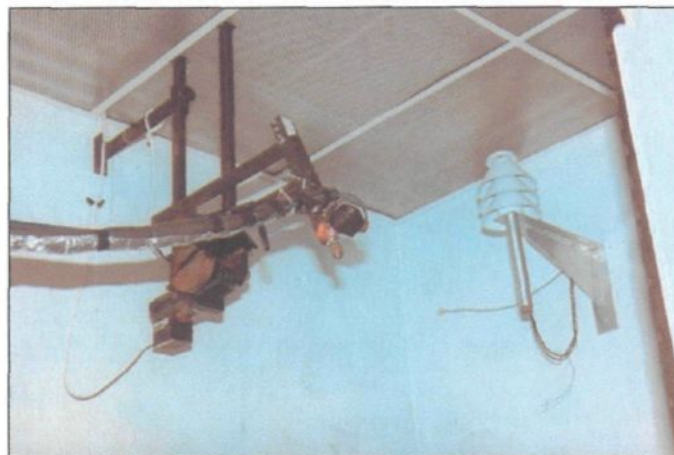


Figure 2.6 : Partie du système hydraulique de la chambre climatique 4m

2.9.2 Conditions expérimentales utilisée dans les essais d'accumulation

Les conditions expérimentales sont détaillées dans le **Tableau 2.1** ci-dessous.

Tableau 2.1 : Conditions expérimentales du givrage pour les essais d'accumulation

<i>Paramètres</i>	<i>Unités</i>	
Type de précipitations	Bruine verglaçante	
Températures (T)		
T échantillons avant givrage	°C	-10 ± 1
T air, T_a	°C	$-10,0 \pm 0,5$
Générateur de précipitations		
Type d'eau		Déionisée
Embout du gicleur		4002
Temps des gicleurs	sec	$ON=0,5$ $OFF=0,8$
Diamètre des gouttes, DVM	μm	200 ± 25
Fréquence de l'oscillateur	Hz	20
Intensité des précipitations	mm/h	6

2.9.3 Procédures

Le montage utilisé est un statif spécialement conçu pour cette mesure disposant de supports magnétiques inclinés 45° et 80° pouvant accommoder 8 échantillons. Le statif est montré à la **Figure 2.7** tel que photographié dans la chambre climatique où les échantillons sont exposés à la précipitation de bruine verglaçante simulée. Les 8 échantillons soumis aux essais d'accumulation comprennent les 7 revêtements étudiés ainsi qu'une lame d'aluminium non recouverte. Le statif est également muni en son centre d'un support horizontal sur lequel est placée une lame d'aluminium témoin. Cette lame sert à déterminer l'intensité des précipitations. Des thermocouples collés sur les échantillons permettent de mesurer via un ordinateur PC la température de la chambre et de la glace au cours des précipitations. Les échantillons sont pesés avant et après les précipitations afin d'obtenir la masse de glace accumulée (m_g).

Les essais d'accumulation sont répétés trois fois. Le glaçage s'effectue pendant une heure ou jusqu'à l'obtention d'une couche de glace de 6 mm sur la poutre horizontale. La position des échantillons subit une rotation entre les tests pour uniformiser les résultats car les échantillons placés aux extrémités du montage reçoivent un peu plus de précipitations.



Figure 2.7 : Montage pour la mesure de la quantité de glace accumulée

2.10 Mesure de la densité de la glace

2.10.1 Matériel

- Balance avec une précision d'au moins 0,01g
- Ficelle fine de fer
- Gobelet
- Scie à ruban
- Statif muni d'une pince crocodile
- Huile possédant une densité certifiée
- Chambre climatique 4m

2.10.2 Procédures

La densité est définie comme étant le rapport de la masse d'un certain volume d'un corps à celle du même volume d'eau. Donc, pour obtenir la densité de la glace, on doit connaître le volume et la masse du morceau de glace. La masse (m_g) est simplement obtenue en pesant le dit morceau avec une balance. Le volume (V) est obtenu à partir de la variation de volume d'un fluide de densité connue dans lequel le morceau de glace est immergé. La masse de fluide (m_{fluide}) déplacé est obtenue en soustrayant la masse du fluide mesuré avec le morceau immergé (P_2) de la masse du fluide avant immersion (P_1). La densité du fluide étant connue, le volume du morceau de glace peut être déterminé en utilisant l'Équation 2.4.

$$\text{Équation 2.4 : } \rho_{\text{fluide}} = m_{\text{fluide}} / V$$

Finalement, la densité se calcule à partir de l'Équation 2.5

$$\text{Équation 2.5 } \rho_{\text{glace}} = \frac{m_g}{\left(\frac{P_2 - P_1}{\rho_{\text{fluide}_1}} \right)}$$

Les manipulations nécessaires sont très simples. Premièrement, il faut placer tout le matériel dans la sous-section de la chambre climatique maintenue à température de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ et attendre que le matériel atteigne cette température. Fermer la ventilation pour minimiser la circulation d'air. Découper à l'aide de la scie à ruban et peser (m_g), un morceau de glace d'environ $5\text{ à }6\text{ cm}^3$. Ensuite, remplir le gobelet d'huile et le peser le tout (P_1). À l'aide

d'une ficelle métallique, attacher le morceau de glace en prenant soin de couper les bouts de ficelle superflus. Plonger le dans le gobelet rempli d'huile (situé sur la balance) et le stabiliser avec le statif muni d'une pince. Le morceau doit être immergé en entier et ne doit pas avoir de contact avec les parois. Finalement, prendre une dernière lecture de la masse (P_2).

2.11 Mesure de l'adhérence de la glace

2.11.1 Matériel

- Chambre climatique 4m et générateur de précipitations

La chambre climatique et le générateur de précipitations utilisés sont les même que ceux décrits dans la section 2.9.1

- Échantillons (5 par revêtement)

Pour la mesure d'adhérence, l'échantillon décrit dans la section 1.4.3 a été modifié. Les modifications sont : le rajout d'un bloc d'aluminium ayant la même largeur que la lame, d'une hauteur de 17,7 mm et une longueur de 51 mm et le forage d'un trou à l'extrémité opposée de la poutre pour permettre la fixation d'un accéléromètre.

- Support pour le givrage des échantillons
- Pied à coulisse
- Appareil de mesure d'adhérence

L'appareil utilisé est un prototype construit spécialement pour cette étude. Une photographie de l'appareil est disponible à l'ANNEXE 1. Il a été conçu de manière à

pouvoir mesurer l'adhérence d'une couche de glace de 13 mm (Blackburn, C., 2000). Le prototype comprend une poutre composite formée de l'échantillon (lame et revêtement) glacé. La poutre composite est fixée à une extrémité sur le support en porte-à-faux. Lors de l'essai d'adhérence, l'extrémité libre de la poutre subit une force exercée par une vis sans fin, poussée par un moteur. La flexion créée par le déplacement de la vis provoque des contraintes de cisaillement qui sont maximales à l'interface glace/revêtement. Lorsque ces contraintes sont suffisantes, la glace décolle. Le décollement de la glace est capté par un accéléromètre et deux capteurs de déplacement de type *LVDT*. Le cisaillement à l'interface est calculé à partir de la force exercée sur la poutre composite mesurée par une cellule de charge. Les données des appareils de mesure sont relayées en temps réel à un ordinateur, ce qui permet ainsi le traitement en continu des données. La rotation du moteur est également contrôlée par un logiciel contrôlant la distance parcourue par la vis, la résolution et la vitesse du moteur.

2.11.2 Conditions expérimentales des essais d'adhérence

Les conditions expérimentales se classifient en deux tableaux : un pour les paramètres du givrage, le **Tableau 2.2** et l'autre pour les paramètres des essais d'adhérence le **Tableau 2.3**.

Tableau 2.2 : Conditions expérimentales du givrage pour les essais d'adhérence

<i>Paramètres</i>	<i>Unités</i>	
Type de précipitations	Bruine verglaçante	
Températures (T)		
T échantillons avant givrage	°C	-10 ± 1
T air, T_a	°C	$-10,0 \pm 0,5$
T moyenne de formation de la glace	°C	$-2,3 \pm 0,2$
Générateur de précipitations		
Type d'eau		Déionisée *
Embout du gicleur		4002
Temps des gicleurs	sec	ON=0,5 OFF=0,8
Diamètre des gouttes, DVM	µm	200 ± 25
Fréquence de l'oscillateur	Hz	20
Intensité des précipitations	mm/h	6

Tableau 2.3 : Conditions expérimentales des tests d'adhérence

<i>Paramètres</i>	<i>Unités</i>	
Températures (T)		
T échantillons (glace)	°C	-10 ± 1
T air, T_a	°C	$-10,0 \pm 0,5$
Tests		
Vitesse du moteur	Hz	100*
Distance parcourue par la vis	mm	5
Résolution		Par défaut
Vitesse de cisaillement (évaluée sur une moyenne de 20 essais d'adhérence)	MPa/sec	0,2 à 0,7
Glace		
Densité moyenne, ρ_{glace}		$0,87 \pm 0,02$
Tailles des grains, d_g	mm	0,23 à 0,57

*Équivaut à 7 mm/sec

2.11.3 Procédures

Une journée d'expérimentation est nécessaire pour mesurer l'adhérence de la glace de 10 échantillons. La première étape est celle de la préparation de l'appareillage. Le réservoir de la chambre climatique doit être rempli au moins de 18 heures avant de commencer le glaçage. La température de l'eau du réservoir n'étant pas contrôlée, il est important de respecter les délais de manière à commencer la précipitation avec de l'eau qui est toujours à la même température. Les échantillons et l'appareil doivent être également entreposer dans la chambre pour qu'ils atteignent la température de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Avant le début de la précipitation, les 10 échantillons sont disposés à l'horizontale sur le statif servant à

empêcher la glace de s'accumuler sur les extrémités des échantillons permettant ainsi à l'échantillon d'être placé en porte à faux. Un thermocouple est collé sur un des échantillons et relayé à l'ordinateur pour permettre l'enregistrement graphique de la température de l'échantillon pendant le glaçage (Voir ANNEXE 2)

Le glaçage des échantillons dure environ 2h30 afin que ceux-ci accumulent environ 13 mm. L'intensité de la précipitation est 5 ± 1 mm/h. Il est à noter que les échantillons placés à l'horizontale accumulent tous la glace à la même vitesse. La couche de glace doit être la plus uniforme possible. Une fois la précipitation terminée (**Figure 2.8**), les échantillons sont gardés dans la chambre pendant $3 \pm 0,5$ h avant d'être soumis aux essais d'adhérence.



Figure 2.8 : Échantillons glacés avant le test d'adhérence

Après l'attente, les tests d'adhérence peuvent commencer. L'appareil est installé et relié à l'ordinateur avec lequel les différents paramètres du test d'adhérence cités dans le **Tableau**

2.3 sont ajustés. Les échantillons sont testés l'un après l'autre. Après avoir posé l'accéléromètre, l'extrémité de l'échantillon est insérée en porte à faux dans le support de l'appareil. Le test est contrôlé par l'ordinateur placé à l'extérieur de la chambre.

A la fin des essais, on recueille un morceau de glace décollé pour en mesurer son épaisseur et sa densité. Tous les paramètres du test sont enregistrés et analysés pour obtenir la valeur de l'adhérence, soit la contrainte de cisaillement lors du décollement. Pour chaque test, une fiche de résultats est produite dont un exemple est donné à l'ANNEXE 3.

2.12 Détermination de la taille des grains de la glace

2.12.1 Appareils

- Microscope à faible grossissement : *Wild Photomakroskop, M 400*
de Wild Heerbrugg, Wild Leitz canada
- Appareil photo: *Wild Photoautomate, MPS 55*
- Film: *Kodak Professional, PJ 400, 35 mm, 400 ASA*
- Lampes: *CanLab*

2.12.2 Procédures

Après l'essai d'adhérence, les surfaces de l'interface de la glace et du revêtement ont été observées et photographiées à l'aide d'un microscope couplé à un appareil photo. Une distance étalon de 1 mm a été déposée sur la surface pour connaître précisément le

grossissement de la photo. La taille moyenne des grains, $\overline{d_g}$ est déterminée à partir des photographies en comptant la moyenne d'intersections, soit la distance parcourue divisée par le nombre de joints d'intersectés.

2.13 Dégradation des revêtements pas rayonnement ultra-violet (UV)

2.13.1 Appareil

- L'appareil : *Q-U-V : The Q Panel Company, No 741938, Cyclic Ultra-Violet Weathering Tester*
- Lampes: *Philips, UV-B, TL 40W/12RS et UV-A, TL 4009N*

L'appareil à dégradation UV (**Figure 2.9**) a été construit spécialement pour permettre d'exposer des échantillons à un rayonnement UV selon la procédure normalisée de *l'American Society For Testing and Materials* (ASTM G53-96, 1996). Le rayonnement UV est produit au moyen de lampes UVa et UVb de façon à simuler le spectre de rayonnement du soleil.



Figure 2.9 : Chambre à rayonnement UV

2.13.2 Procédures

Les échantillons ont été coupés en deux morceaux. Pour chaque revêtement étudié, quatre morceaux ont été exposés aux rayonnements. Les pièces exposées ont subi une rotation pour uniformiser le rayonnement.

CHAPITRE 3

LES REVÊTEMENTS ÉTUDIÉS

3 LES REVÊTEMENTS ÉTUDIÉS

3.1 Introduction

Dans ce travail, les produits sélectionnés pour l'étude ont été identifiés par une lettre. Les caractéristiques de chaque revêtement ainsi que celles de l'aluminium sont présentées sous forme de tableau. Ces caractéristiques sont celles mesurées avant que l'échantillon ait subi le premier glaçage. À la fin du chapitre, une classification des produits sera effectuée selon leur affinité avec l'eau et leur texture.

3.2 Le revêtement A

Tableau 3.1 : Caractéristiques initiales du revêtement A

NATURE DU PRODUIT (Données du fabricant)	Inconnue	
ORIGINE	États-Unis	
FONCTIONS USUELLES	Produit vendu dans le domaine de l'aviation, pour protéger de la pluie et réduire l'adhérence de la glace aux pare-brises.	
PRÉ-TRAITEMENT	Aucun	
TEXTURE ET COULEUR (Figure 3.1)	Avant son application, le produit est un liquide translucide possédant une viscosité semblable à celle de l'eau. Séché à l'air, il laisse une fine pellicule translucide sur l'aluminium.	
RUGOSITÉ, R_a (Figure 3.2)	0,79 μm	$\sigma = 0,14 \mu\text{m}$
ÉNERGIE DE SURFACE, γ_s	71,5 mJ/m^2	$r^2 = 0,99$
ANGLE DE CONTACT MOYEN AVEC H_2O DÉIONISÉE, $\bar{\theta}_e$	16°	$\sigma = 3^\circ$

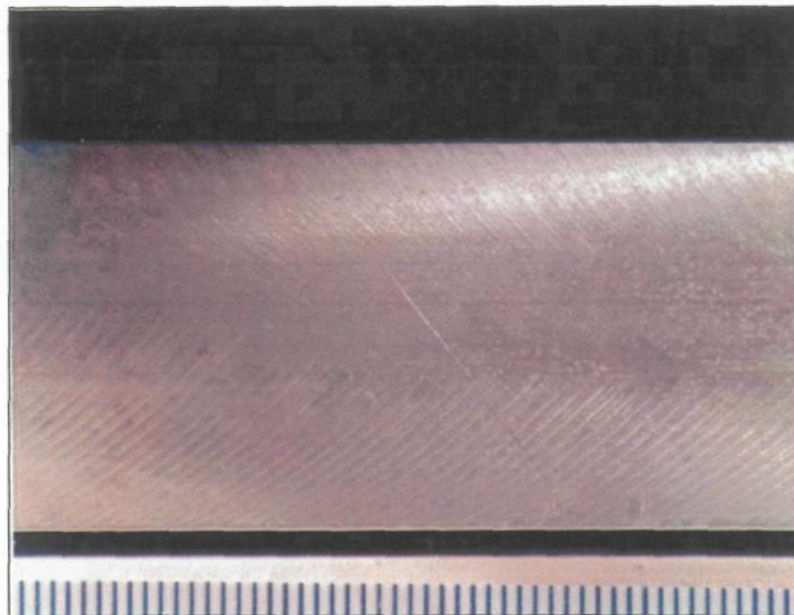


Figure 3.1 : Partie de la surface de l'échantillon recouverte du revêtement A
(Agrandie par un facteur 2)

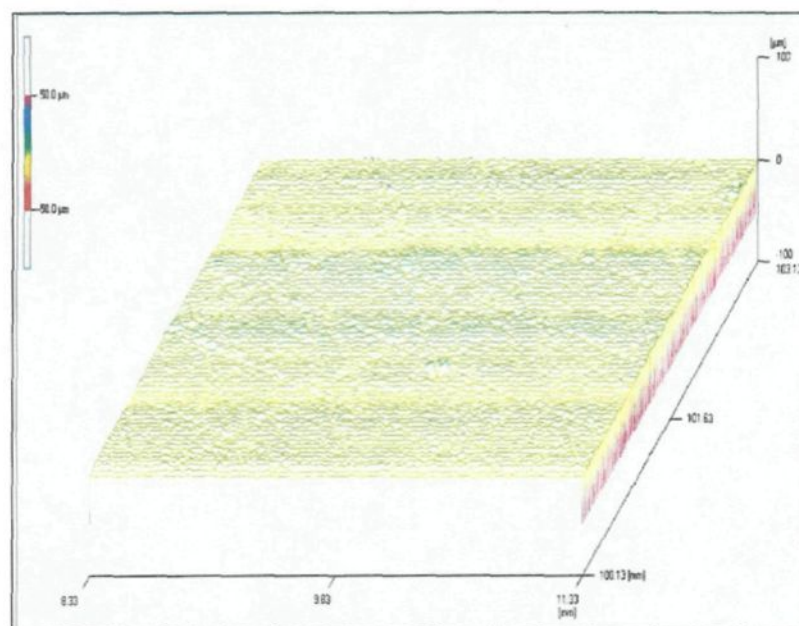


Figure 3.2 : Représentation du profil de surface d'un échantillon recouvert du revêtement A
(Zone de 3mm*3mm, Résolution 50 pt/mm)

3.3 Le revêtement D

Tableau 3.2 : Caractéristiques initiales du revêtement D

NATURE DU PRODUIT <i>(Données du fabricant)</i>	méthyle éthyle cétone	(17 %)
	dérivés de glycol	(17 %)
	xylène	(17 %)
	Silice (cristaux)	(3 %)
	Autres	(45 %)
ORIGINE	Etats-Unis	
FONCTIONS USUELLES	Produit vendu par une compagnie spécialisée dans les peintures anti-corrosion	
PRÉ-TRAITEMENT	Le produit arrive en deux composantes : A et B. Il suffit de mélanger 5 portions de A dans 1 portion de B	
TEXTURE ET COULEUR (Figure 3.3)	Le produit est une peinture blanche, légèrement verdâtre. Le revêtement est rigide et rugueux	
RUGOSITÉ, R_a (Figure 3.4)	5,02 μm	$\sigma = 0,30 \mu\text{m}$
ÉNERGIE DE SURFACE, γ_s	7,1 mJ/m^2	$r^2 = 0,57$
ANGLE DE CONTACT MOYEN AVEC H_2O DÉIONISÉE, $\bar{\theta}_c$	145°	$\sigma = 4^\circ$

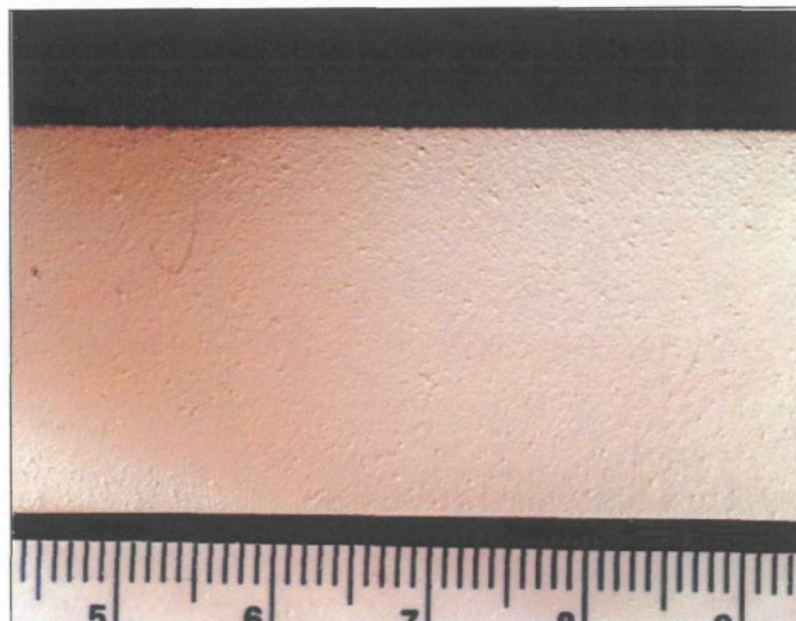


Figure 3.3 : Partie de la surface de l'échantillon recouverte du revêtement **D**
(Agrandie par un facteur 2)

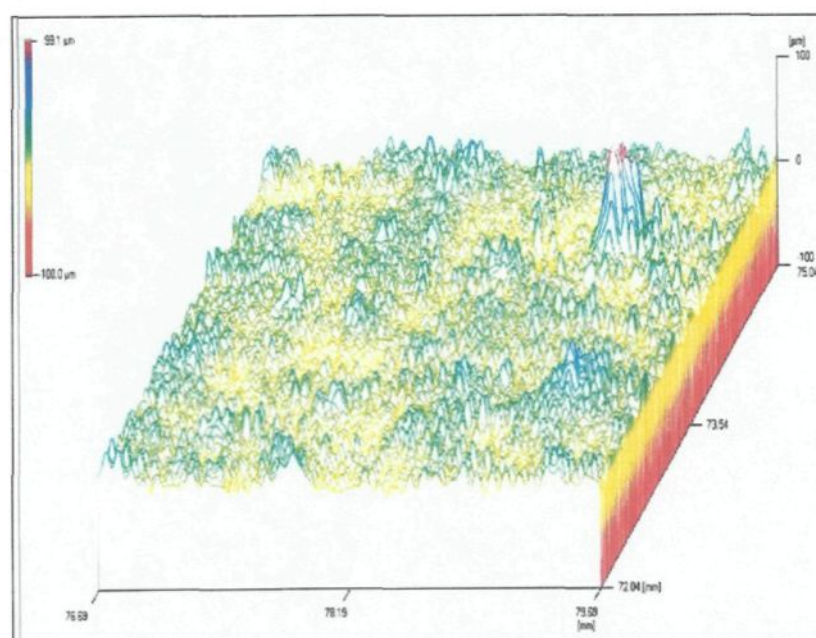


Figure 3.4 : Représentation du profil de surface d'un échantillon recouvert du revêtement **D**
(Zone de 3mm*3mm, Résolution 100 pt/mm)

3.4 Le revêtement H

Tableau 3.3 : Caractéristiques initiales du revêtement H

NATURE DU PRODUIT (Données du fabricant)	Produit à base de résine de silicone	
ORIGINE	Japon	
FONCTIONS USUELLES	Produit est vendu pour la protection des antennes de télécommunication	
PRÉ-TRAITEMENT	Le produit arrive avec une composante principale et un solvant. La composante principale doit être diluée dans des proportions en poids de 100 parties de solvant dans 33 parties du composant principal. Ensuite, une filtration est nécessaire pour éliminer les bulles d'air dans la solution.	
TEXTURE ET COULEUR (Figure 3.5)	Le revêtement est translucide rigide et mince. Sa surface est lisse mais possède quelques pics rugueux.	
RUGOSITÉ, R_a (Figure 3.6)	0,87 μm	$\sigma = 0,15 \mu\text{m}$
ÉNERGIE DE SURFACE, γ_s	11.5 mJ/m^2	$r^2 = 0,90$
ANGLE DE CONTACT MOYEN AVEC H_2O DÉIONISÉE, $\bar{\theta}_e$	109°	$\sigma = 1^\circ$

3.5 Le revêtement L

Tableau 3.4 : Caractéristiques initiales du revêtement L

NATURE DU PRODUIT (Données du fabricant)	Peinture de micro-siloxane	
ORIGINE	Allemagne	
FONCTIONS USUELLES	Peinture vendue pour protéger les façades des immeubles. La peinture garde les façades sèches et propres. Conçue pour adhérer sur des mortiers ou les vieilles peintures.	
PRÉ-TRAITEMENT	Il nécessite l'application d'une couche d'apprêt fournie par la compagnie.	
TEXTURE ET COULEUR (Figure 3.7)	Le produit est une peinture blanche très épaisse. Le revêtement est rigide et rugueux	
RUGOSITÉ, R_a (Figure 3.8)	3,62 μm	$\sigma = 0,03 \mu\text{m}$
ÉNERGIE DE SURFACE, γ_s	6,0 mJ/m^2	$r^2 = 0,40$
ANGLE DE CONTACT MOYEN AVEC H_2O DÉIONISÉE, $\bar{\theta}_e$	141°	$\sigma = 2^\circ$

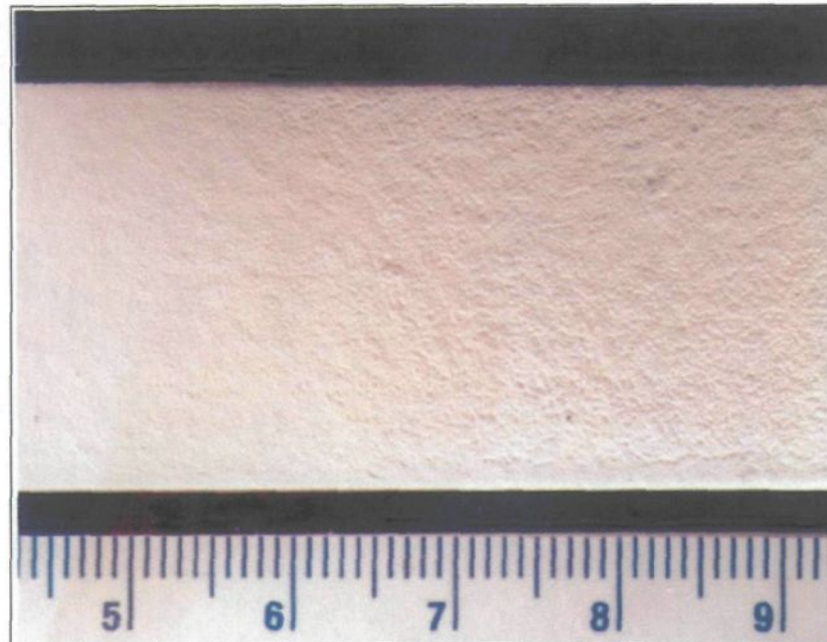


Figure 3.7 : Partie de la surface de l'échantillon recouverte du revêtement **L**
(Agrandie par un facteur 2)

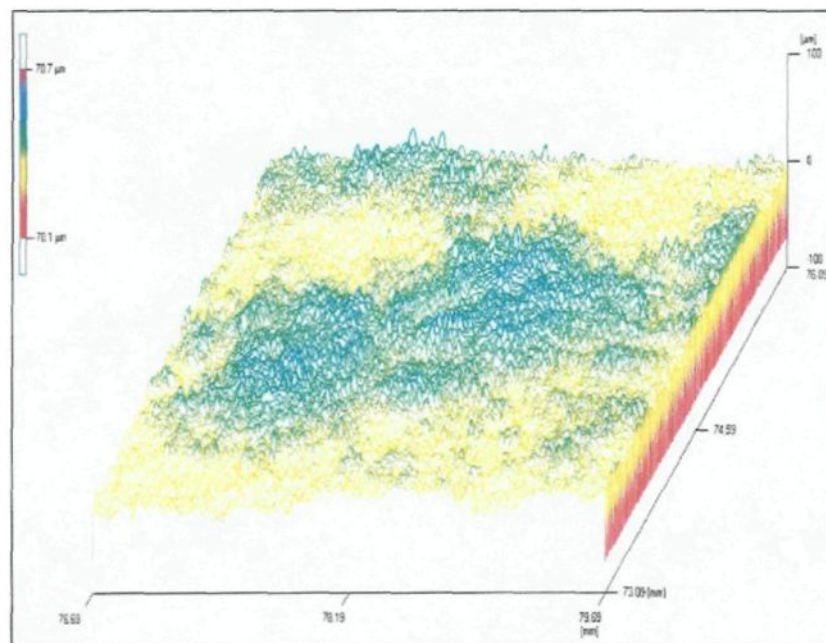


Figure 3.8 : Représentation du profil de surface d'un échantillon recouvert du revêtement **L**
(Zone de 3mm*3mm, Résolution 100 pt/mm)

3.6 Le revêtement P

Tableau 3.5 : Caractéristiques initiales du revêtement P

NATURE DU PRODUIT (Données du fabricant)	Produit contenant principalement des hydrocarbones aromatiques et de la paraffine multi-cristalline	
ORIGINE	Canada	
FONCTIONS USUELLES	Produit vendu pour protéger les surfaces de : l'eau salée, la pluie, la neige, la pluie acide, la glace, l'oxydation et les rayonnements UV.	
PRÉ-TRAITEMENT	Aucun (le produit s'applique comme il est vendu). Il sèche en seulement 5 minutes.	
TEXTURE ET COULEUR (Figure 3.9)	Le produit est un liquide blanchâtre. Une fois sec, le revêtement est rugueux et possède une texture semblable au caoutchouc.	
RUGOSITÉ, R_a (Figure 3.10)	4,92 μm	$\sigma = 1,70 \mu\text{m}$
ÉNERGIE DE SURFACE, γ_s *	12,7 mJ/m^2	$r^2 = 0,40$
ANGLE DE CONTACT MOYEN AVEC H_2O DÉIONISÉE*, $\bar{\theta}_c$	114°	$\sigma = 2^\circ$

* Calculée sans la mesure de l'angle de contact du diiodométhane

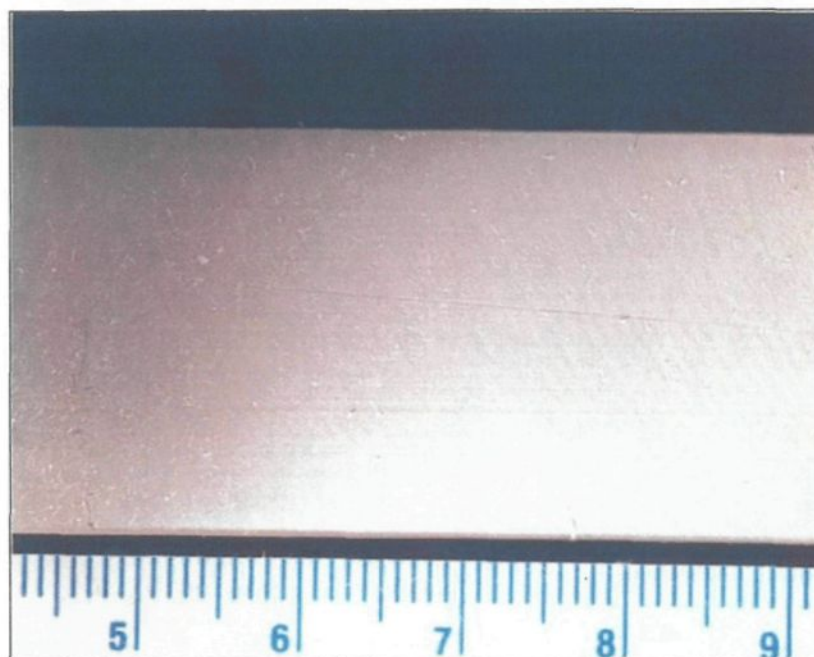


Figure 3.9 : Partie de la surface de l'échantillon recouverte du revêtement **P**
(Agrandie par un facteur 2)

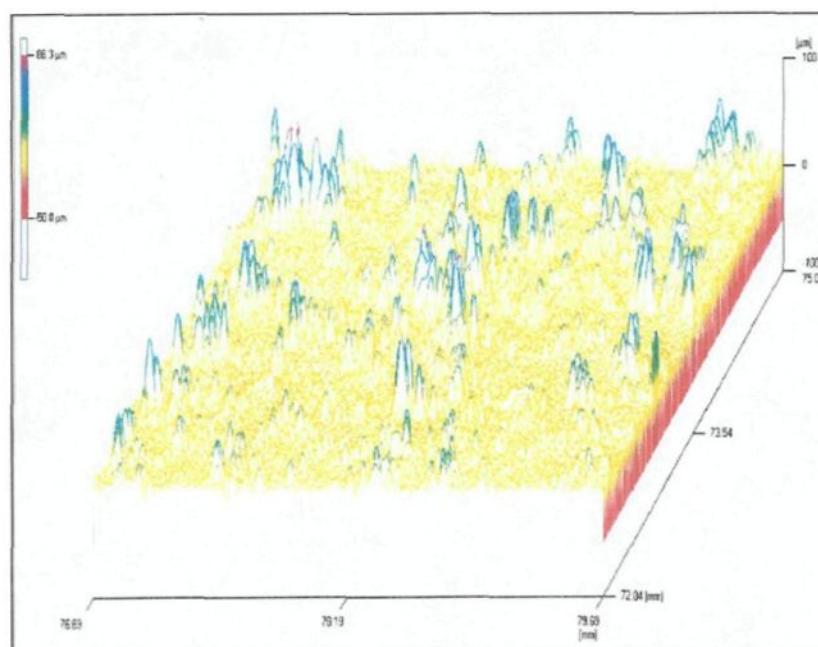


Figure 3.10 : Représentation du profil de surface d'un échantillon recouvert du revêtement **P**
(Zone de 3mm*3mm, Résolution 100 pt/mm)

3.7 Le revêtement S

Tableau 3.6 : Caractéristiques initiales du revêtement S

NATURE DU PRODUIT (Données du fabricant)	Inconnu
ORIGINE	Canada
FONCTIONS USUELLES	Produit vendu par une compagnie spécialisée dans les installations destinées aux télécommunications. Le produit est vendu pour protéger les antennes contre la neige et la glace.
PRÉ-TRAITEMENT	Il nécessite l'application d'une couche d'apprêt fournie par la compagnie.
TEXTURE ET COULEUR (Figure 3.11)	Le produit est un liquide blanchâtre. En l'appliquant, il fait des craquelures. Une fois sec, il possède la texture d'une poudre blanche très fine et compacte. La poudre est assez compacte pour avoir une certaine rigidité semblable à celle d'une craie.
RUGOSITÉ, R_a (Figure 3.12)	19,5 μm $\sigma = 7,1 \mu\text{m}$
ÉNERGIE DE SURFACE, γ_s	Méthode non-applicable
ANGLE DE CONTACT MOYEN AVEC H_2O DÉIONISÉE, $\bar{\theta}_c$	148° $\sigma = 3^\circ$

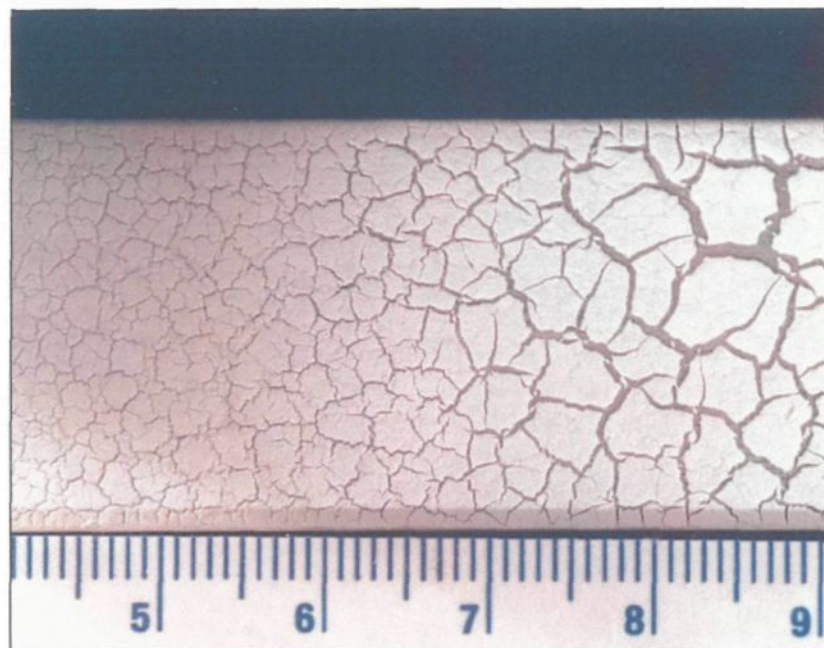


Figure 3.11 : Partie de la surface de l'échantillon recouverte du revêtement S
(Agrandie par un facteur 2)

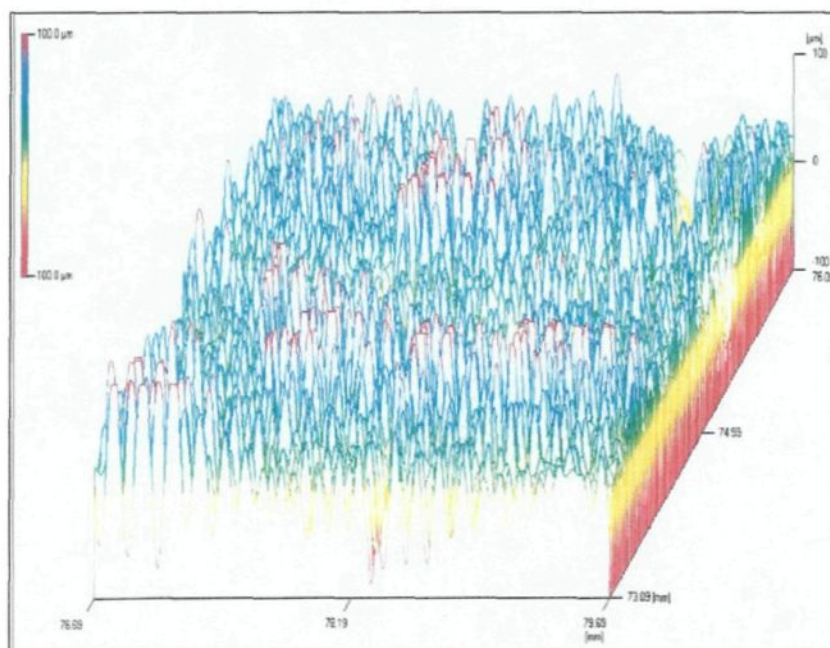


Figure 3.12 : Représentation du profil de surface d'un échantillon recouvert du revêtement S
(Zone de 3mm*3mm, Résolution 100 pt/mm)

3.8 Le revêtement W

Tableau 3.7 : Caractéristiques initiales du revêtement W

NATURE DU PRODUIT (Données du fabricant)	Peinture d'époxy greffé de silicone	
ORIGINE	Etats-Unis	
FONCTIONS USUELLES	Le produit est vendu par une compagnie spécialisée dans les revêtements protecteurs. Le revêtement W est vendu pour ces propriétés anti-adhérentes à la glace.	
PRÉ-TRAITEMENT	Le produit arrive sous forme de trois composantes qui doivent être mélangées juste avant son application.	
TEXTURE ET COULEUR (Figure 3.13)	Le produit est une peinture de couleur grise. Une fois sec, le revêtement est lisse et très rigide.	
RUGOSITÉ, R_a (Figure 3.14)	1,23 μm	$\sigma = 0,07 \mu\text{m}$
ÉNERGIE DE SURFACE, γ_s	12,4 mJ/m^2	$r^2 = 0,65$
ANGLE DE CONTACT MOYEN AVEC H_2O DÉIONISÉE, $\bar{\theta}_e$	111°	$\sigma = 3^\circ$

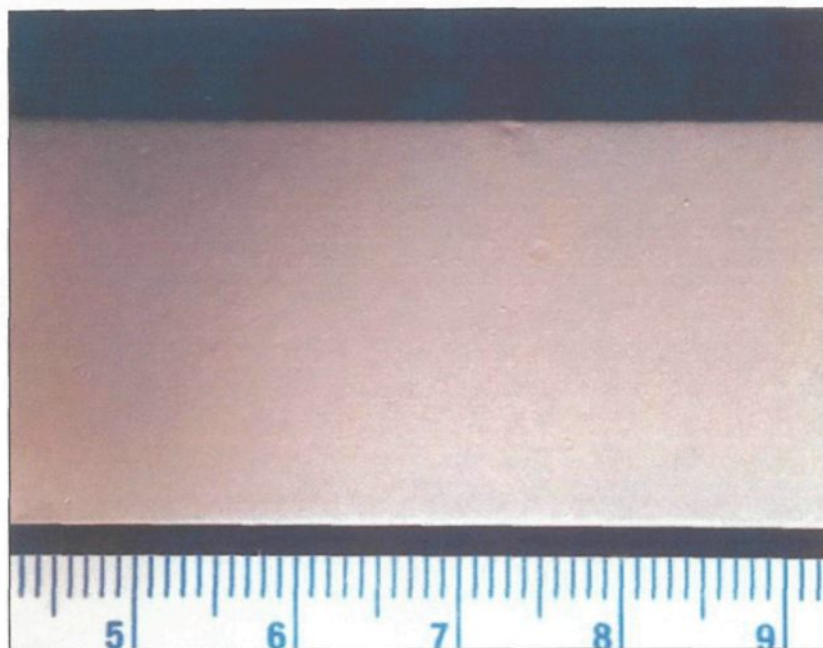


Figure 3.13 : Partie de la surface de l'échantillon recouverte du revêtement **W**
(Agrandie par un facteur 2)

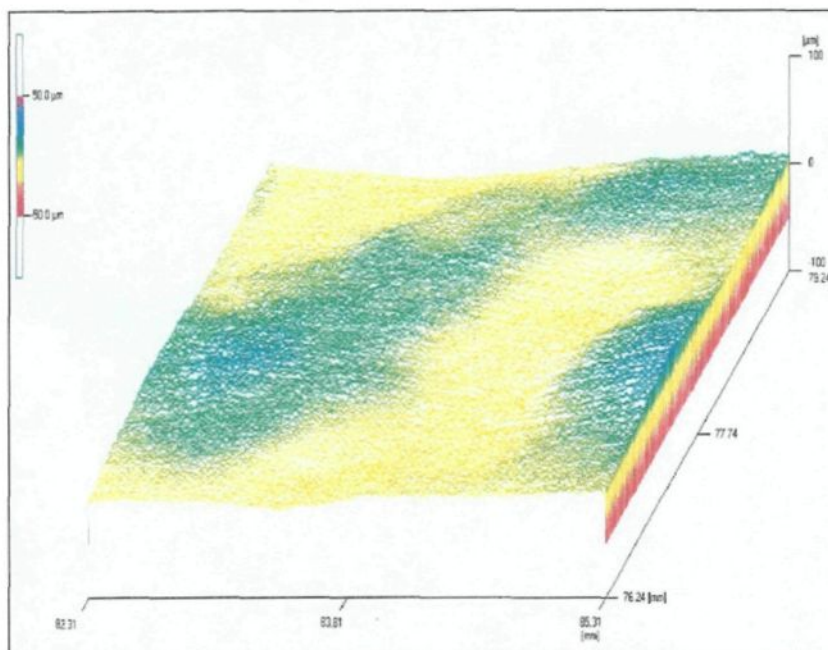


Figure 3.14 : Représentation du profil de surface d'un échantillon recouvert du revêtement **W**
(Zone de 3mm*3mm, Résolution 100 pt/mm)

3.9 L'aluminium

Tableau 3.8 : Caractéristiques initiales de l'aluminium

TYPE	6061 T6	
RUGOSITÉ, R_a	1,02 μm	$\sigma = 0,05 \mu\text{m}$
ANGLE DE CONTACT MOYEN AVEC H_2O DÉIONISÉE, $\bar{\theta}_c$	46 °	$\sigma = 8^\circ$

3.10 Classifications des revêtements

Pour faciliter l'analyse et la compréhension du phénomène de l'adhérence de la glace sur différentes surfaces, les revêtements sélectionnés pour l'étude ont été classifiés selon leur comportement chimique et leur texture. La **Figure 3.15** illustre cette classification où on compte un produit hydrophile et 6 produits hydrophobes. Ces derniers se divisent en quatre rigides, un viscoélastique et un poudreux.

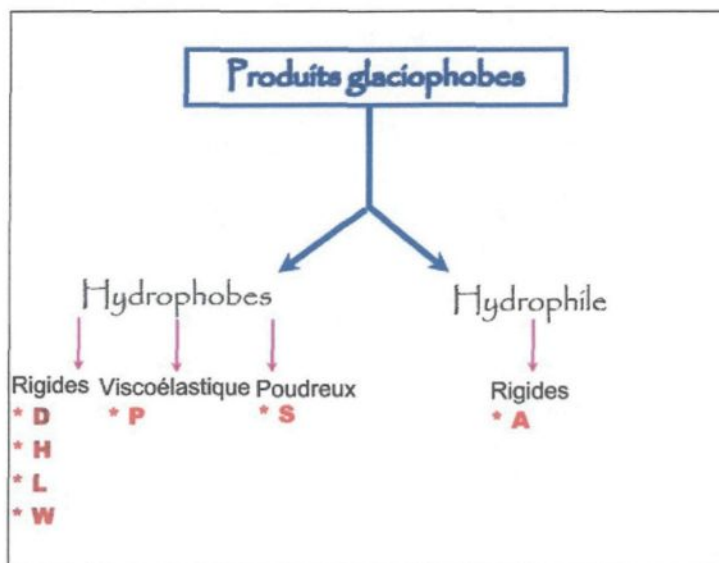


Figure 3.15 : Classification des produits glaciophobes sélectionnés

CHAPITRE 4

RÉSULTATS

4 RÉSULTATS

4.1 Introduction

Les résultats relatifs au projet de recherche seront présentés en 3 principales parties. La première partie présente les résultats relatifs à l'effet des revêtements sur l'accumulation de glace lors de précipitations verglaçantes. Les deux autres parties montrent les résultats d'adhérence de la glace aux revêtements ainsi que ceux tests de vieillissement par rayonnement UV.

4.2 Masse de glace accumulée sur les échantillons inclinés

Une substance parfaitement glaciophobe devrait idéalement diminuer l'adhérence de façon à ce que la glace ne s'accumule pas ou très faiblement sur celle-ci. Malheureusement, les substances reconnues comme glaciophobes accumulent une quantité de glace lorsqu'elles sont soumises à des précipitations verglaçantes. Pour étudier l'effet d'une substance glaciophobe sur la quantité de glace accumulée, on a effectué des essais où les échantillons inclinés à 45° et 80° sont exposés à de la bruine verglaçante. La bruine verglaçante est obtenue avec les mêmes conditions que celles utilisées pour former la couche de glace nécessaire aux tests d'adhérence.

Les résultats sont présentés dans les **Tableau 4.1** et **Tableau 4.2** ci-après. Le premier est représentatif de l'inclinaison de 45° et le second de celle de 80°.

Tableau 4.1 : Masse de glace accumulée sur des échantillons inclinés à 45°

Type de précipitation : Bruine verglaçante (taille des gouttes de 200 µm)				
Intensité des précipitations : 6 mm/h (voir Tableau 2.1)				
Température de formation : -2,5 ± 1,5 °C				
Revêtement	Test 1 m_g (± 0,1 g)	Test 2 m_g (± 0,1 g)	Test 3 m_g (± 0,1 g)	Moyenne m_g (± écart-type g)
Inclinés à 45°				
A	41,0	30,0	32,0	34 ± 6
D	43,0	33,0	34,0	37 ± 6
L	31,0	39,0	38,0	36 ± 4
H	37,0	31,0	-----	34 ± 4
P	30,0	36,0	31,0	32 ± 3
S	35,0	33,0	28,0	32 ± 4
W	35,0	37,0	36,0	36 ± 1
Aluminium	32,0	35,0	28,0	32 ± 4
Moyenne de la masse accumulée, tous produits confondus				35 ± 2
À l'horizontal				
Aluminium	39,0	43,0	35,0	39 ± 4

Tableau 4.2 : Masse de glace accumulée sur des échantillons inclinés à 80° par rapport à l'horizontale

Type de précipitation : Bruine verglaçante (taille des gouttes de 200 µm)				
Intensité des précipitations : 6 mm/h (voir Tableau 2.1)				
Température de formation : -7,1 ± 0,5 °C				
Revêtement	Test 1 m _g (± 0,1 g)	Test 2 m _g (± 0,1 g)	Test 3 m _g (± 0,1 g)	Moyenne m _g (± écart-type g)
Inclinés à 80°				
A	13,0	10,0	9,0	11 ± 2
D	11,0	10,0	10,0	10 ± 1
L	10,0	12,0	10,0	11 ± 1
H	11,0	11,0	9,0	10 ± 1
P	9,0	11,0	11,0	10 ± 1
S	11,0	6,0	8,0	8 ± 3
W	11,0	11,0	11,0	11
Aluminium	9,0	10,0	9,0	10 ± 1
Moyenne de la masse accumulée, tous produits confondus				10 ± 1
À l'horizontal				
Aluminium	39,0	43,0	35,0	39 ± 4

Type de glace

À première vue, on observe que le type de glace obtenue à l'inclinaison de 45° est différent de celui observé à 80°. Effectivement, sur les poutres inclinées de 80°, l'accumulation prend

la forme de dendrites friables, tandis qu'à 45° , l'accumulation est un givre lourd semblable à celui obtenu lorsque l'échantillon n'est pas incliné (**Figure 4.1**). Cette différence est attribuable à la diminution de la surface de capture. La surface inclinée capte moins de gouttes d'eau par unité de surface. Alors, les poutres sont moins réchauffées par la chaleur latente dégagée à la solidification de l'eau. La faible température des poutres ($-7,1^\circ\text{C}$) provoque une croissance rapide des cristaux de glace. Pour une inclinaison de 45° , la température mesurée de $-2,5^\circ\text{C}$ est sensiblement la même que celle d'un échantillon horizontal. C'est pourquoi on doit s'attendre à former le même type de glace.



Figure 4.1 : Glace accumulée sur des échantillons inclinés

Quantité de glace accumulée

Lorsque les échantillons sont inclinés à 45° , la quantité de la glace sur celle-ci est très peu influencée. Dans les mêmes conditions, la masse de glace accumulée sur une poutre

d'aluminium inclinée est d'environ 32 g comparativement à 39 g lorsqu'elle ne l'est pas. La surface étant de même nature, cette différence de masse est attribuable à la diminution de la surface de capture due à l'inclinaison. Pour démontrer un effet de diminution de l'accumulation de la glace provoquée par un effet glaciophobe, il faut que l'échantillon accumule moins de 32 g de glace. La masse de 35 g de glace accumulée sur les revêtements est trop élevée pour démontrer un effet significatif de l'effet glaciophobe sur la quantité de glace.

Également, lorsque l'inclinaison des échantillons est de 80° , les échantillons recouverts d'un revêtement glaciophobe accumulent la même quantité de glace que l'aluminium. En effet, un échantillon d'aluminium incliné de cet angle et subissant ce type de précipitation accumule en moyenne 10 g de glace, soit la même valeur que celle formée sur les échantillons recouverts. En effet, la nucléation des gouttelettes d'eau sur les surfaces étant très rapide, celles-ci n'ont pas le temps nécessaire pour glisser sur les surfaces hydrophobes inclinées et éviter l'accumulation de la glace.

Donc, les produits à caractère glaciophobe sélectionnés pour cette étude ne semblent pas, dans les conditions de bruine verglaçante d'intensité de 6mm/h, diminuer la masse de glace accumulée. D'autres tests simulant d'autres types de précipitations à différentes intensités seraient nécessaires pour conclure si, en général, les produits glaciophobes n'ont aucun effet sur la quantité de glace qu'ils accumulent.

4.3 L'adhérence, l'hydrophobicité et la rugosité

4.3.1 Introduction

La démarche utilisée pour la présentation des résultats d'adhérence est la suivante. Premièrement, les résultats d'adhérence de chaque revêtement seront présentés et discutés en fonction du nombre de déglacages. Deuxièmement, une analyse comparative entre les performances des revêtements sera effectuée.

Les résultats obtenus avec chaque produit sont présentés sous forme de deux graphiques. Le premier représente l'adhérence en fonction du nombre de déglacages subis par l'échantillon. Ce graphique contient les points expérimentaux ainsi que trois courbes. La première, en pointillé rose, correspond à l'adhérence mesurée sur l'aluminium. La deuxième, en bleu, correspond à l'adhérence moyenne du revêtement. Et la dernière courbe, en noir, est une régression linéaire des valeurs d'adhérence. Le second graphique, présente les valeurs mesurées de rugosité, R_a et de l'angle de contact de l'eau, θ_c en fonction du nombre de déglacages. Ces deux mesures ont été prises à la suite des mesures d'adhérence pour permettre de suivre l'évolution du profil de surface et de l'hydrophobicité au cours de l'utilisation du revêtement. À la suite de ces deux graphiques, un tableau donne le pourcentage de réduction de l'adhérence de la glace sur le revêtement. Ce pourcentage est celui calculé à partir de la valeur moyenne de l'adhérence de la glace mesurée lors de tous les déglacages est comparée à celle de l'aluminium. Ainsi exprimé, lorsque l'adhérence

mesurée sur un échantillon est plus grande que celle obtenue sur l'aluminium, le pourcentage devient négatif.

Il est à noter que les résultats d'adhérence ont été caractérisés en terme de fractures cohésives et adhésives.

- Cohésive : lors du décollement, la couche de glace sur l'échantillon se brise en au moins deux morceaux;
- Adhésive : le décollement de la couche de glace se fait en un seul morceau;

Une analyse a été effectuée pour déterminer si le type de fracture avait une influence sur la force d'adhérence mesurée. Aucune influence ou observation commune n'a pu être tirée des résultats. Pour cette raison, les résultats inclus dans le graphique seront présentés sans faire de distinction entre les deux types de fracture. Par contre, le comportement de la glace lors de la rupture sera discuté dans le texte suivant les résultats.

4.3.2 L'aluminium

Afin de pouvoir comparer l'adhérence de la glace à différents revêtements, il est intéressant d'en connaître la valeur mesurée sur l'aluminium dans les mêmes conditions expérimentales (**Tableau 2.3**) que les revêtements. Les valeurs d'adhérence mesurées sur l'aluminium, dont les propriétés sont montrées dans le **Tableau 3.8**, ont été tirées d'un rapport rédigé dans le cadre d'un projet effectué au LIMA (Blackburn, C., 2000). La valeur moyenne obtenue est présentée dans le **Tableau 4.3** ci-après.

Tableau 4.3 : Valeur moyenne de l'adhérence de la glace sur l'aluminium

Adhérence moyenne de la glace, $\bar{\tau}$ (Ruptures adhésives et cohésives) $T_{\text{air et glace}} = -10,0 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ $\rho_{\text{glace}} = 0,87 \pm 0,02$	$0,082 \pm 0,026 \text{ MPa}^*$
--	---------------------------------

*(Blackburn, C., 2000)

4.3.3 Revêtement A

Les résultats obtenus pour le revêtement A sont montrés à la **Figure 4.2, 4.3** et au **Tableau 4.4** tel que décrit sommairement à l'introduction de cette section.

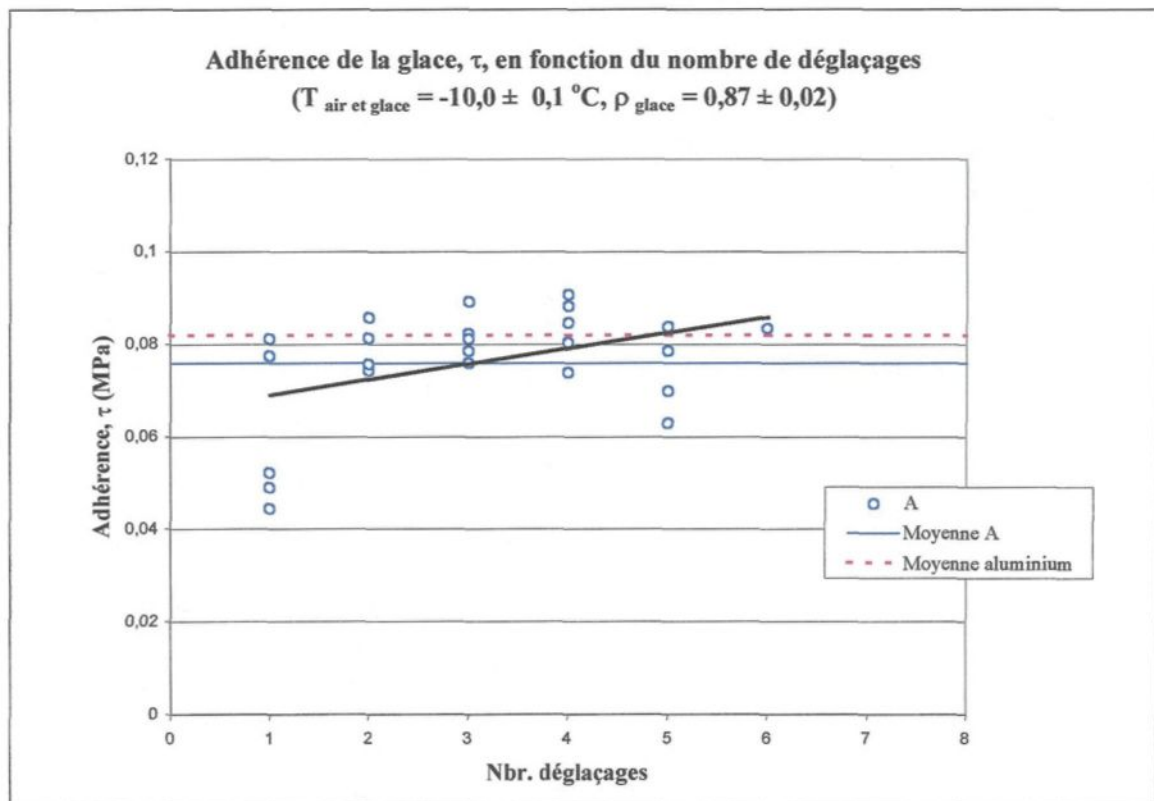


Figure 4.2 : Adhérence de la glace au revêtement A

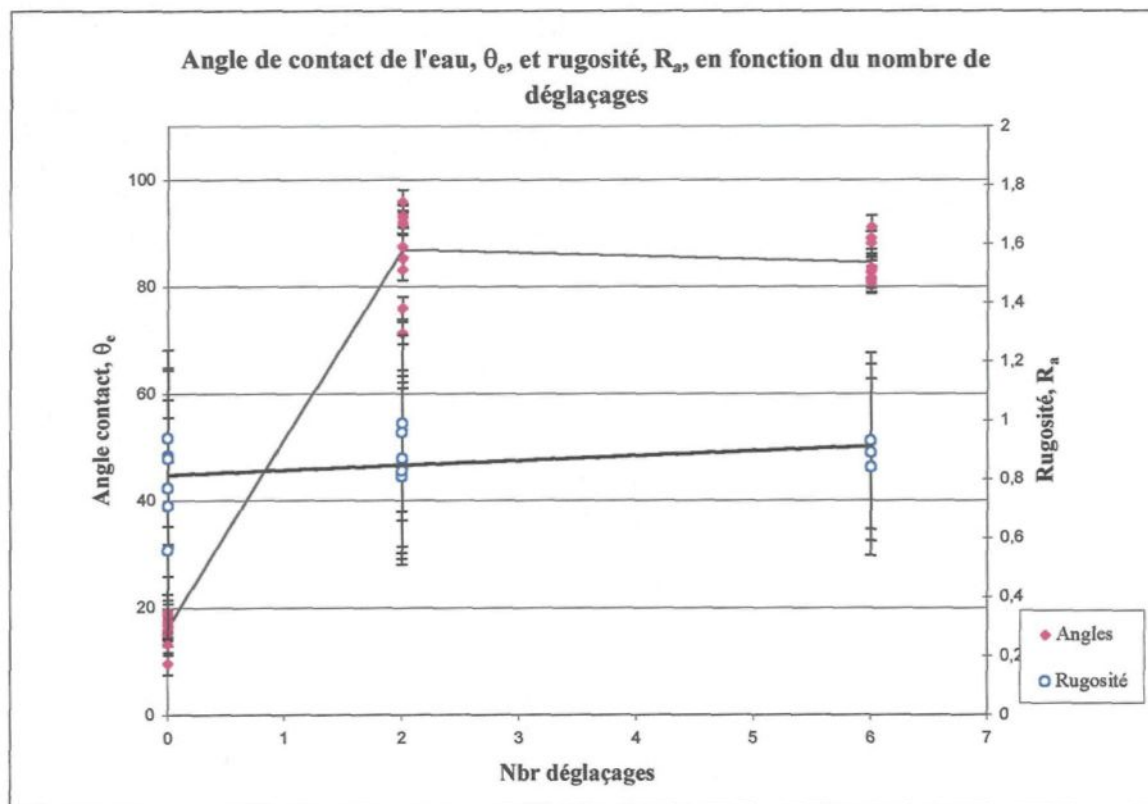


Figure 4.3: Angle de contact et rugosité du revêtement A

Tableau 4.4 : Caractéristiques moyennes du revêtement A

Caractéristiques	Valeurs et écart type (calculés avec les données des 6 déglacages)
Adhérence moyenne de la glace, $\bar{\tau}$ (Ruptures adhésives et cohésives) $T_{\text{air et glace}} = -10,0 \pm 0,1^\circ\text{C}$ $\rho_{\text{glace}} = 0,87 \pm 0,02$	$0,076 \pm 0,012 \text{ MPa}$
Pourcentage de réduction d'adhérence (par rapport à l'aluminium)	7 %
Rugosité moyenne, \bar{R}_a	$0,9 \pm 0,1 \mu\text{m}$
Angle de contact moyen de l'eau, $\bar{\theta}_e$	$63 \pm 34^\circ$
Taille moyenne des grains à l'interface glace/revêtement, \bar{d}_g	Non disponible

Le revêtement A est le seul revêtement, étudié dans cette étude, ayant des propriétés hydrophiles, c'est-à-dire un angle de contact avec l'eau initiale de $16 \pm 3^\circ$. L'adhérence moyenne de la glace sur ce produit est de $0,076 \pm 0,012$ MPa. Le revêtement A réduit donc l'adhérence de la glace sur l'aluminium de 0,006 MPa, ce qui correspond à une réduction de 7%. La plus grande efficacité du produit A est obtenue lors de sa première utilisation où l'adhérence est la plus faible valant 0,05 MPa. La courbe en noir de la **Figure 4.2** montre que l'adhérence tend à augmenter très légèrement avec le nombre de cycles glaçage/déglaçage.

La rugosité, R_a , suit sensiblement la même tendance que l'adhérence, c'est à dire qu'elle augmente très légèrement en fonction du nombre de déglacages. Par contre, l'angle de contact, θ_c , augmente considérablement après les deux premiers glaçages. Le produit A perd son hydrophilie dès ses premières utilisations. En effet, l'angle de contact passe de 16° à 85° lorsqu'il est glacé deux fois et par la suite, la valeur de l'angle est conservée. Contrairement aux hypothèses voulant que l'adhérence diminue avec l'augmentation de l'angle de contact, l'adhérence sur le revêtement A augmente sans être influencé par la variation marquée de l'hydrophilie.

Même si la majorité des ruptures observées à l'interface glace/échantillon sont de type adhésives, on observe des petits cristaux blancs qui sont demeurés collés à la surface après le décollement. Cette couche de cristaux d'environ 1 mm d'épais n'est pas uniforme sur l'échantillon.

4.3.4 Le revêtement D

Les résultats obtenus pour le revêtement D sont montrés à la **Figure 4.4, 4.5** et au **Tableau 4.5** de la même façon que pour le revêtement précédant

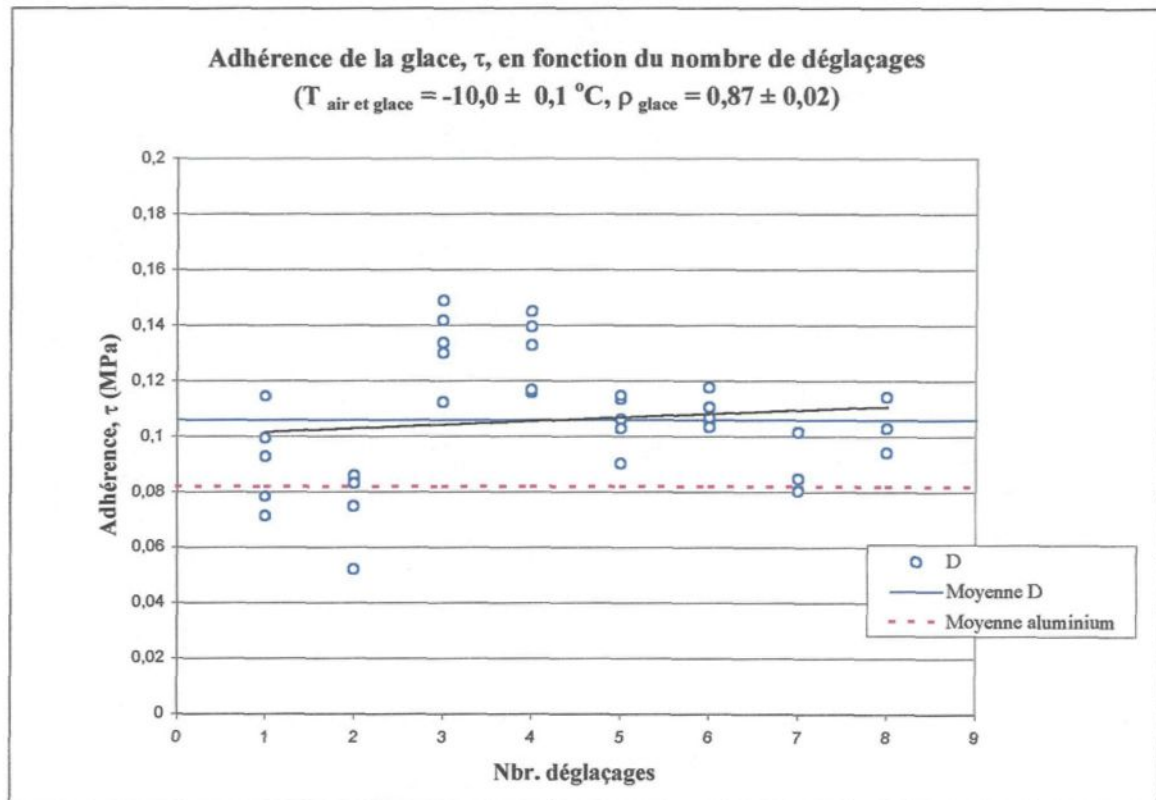
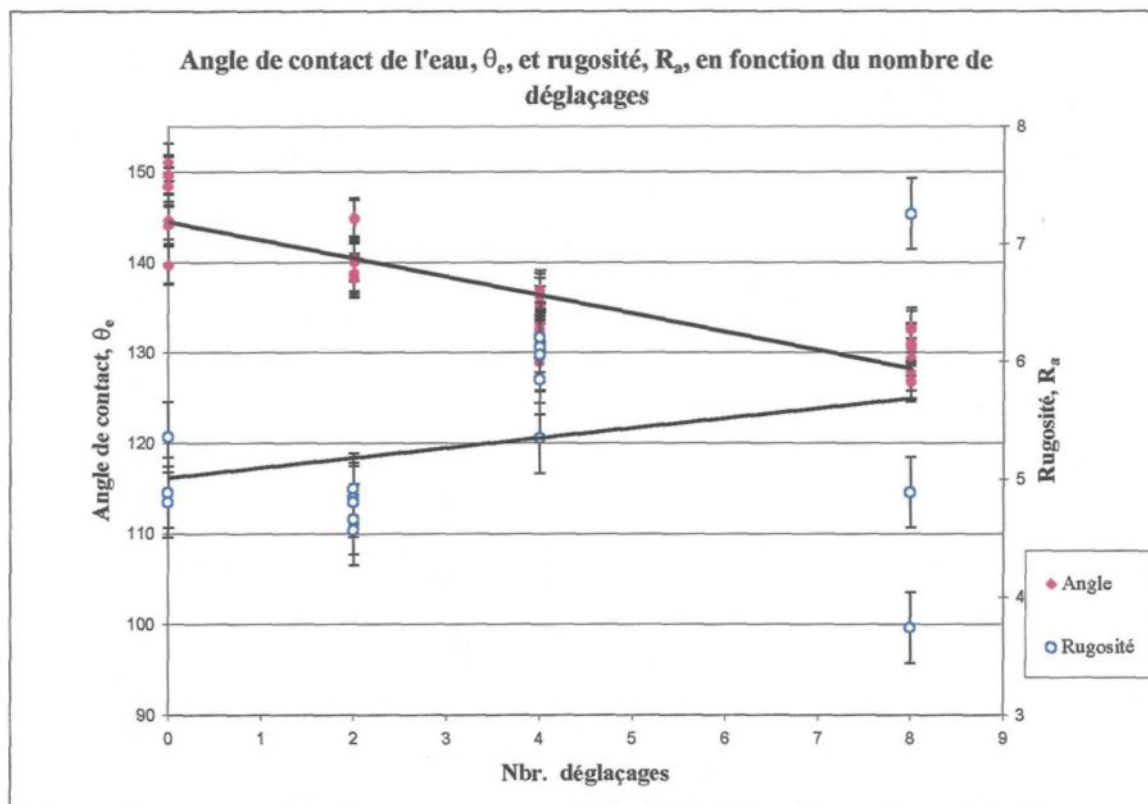


Figure 4.4 : Adhérence de la glace au revêtement **D**

Figure 4.5: Angle de contact et rugosité du revêtement **D**Tableau 4.5 : Caractéristiques moyennes du revêtement **D**

Caractéristiques	Valeurs et écart type (calculés avec les données des 8 déglacages)
Adhérence moyenne de la glace, $\bar{\tau}$ (Ruptures adhésives et cohésives) $T_{\text{air et glace}} = -10,0 \pm 0,1^\circ\text{C}$ $\rho_{\text{glace}} = 0,87 \pm 0,02$	$0,106 \pm 0,022 \text{ MPa}$
Pourcentage de réduction d'adhérence (par rapport à l'aluminium)	-29 % *
Rugosité moyenne, \bar{R}_a	$5,3 \pm 0,8 \mu\text{m}$
Angle de contact moyen de l'eau, $\bar{\theta}_e$	$137 \pm 7^\circ$
Taille moyenne des grains à l'interface glace/revêtement, \bar{d}_g	$0,37 \pm 0,09 \text{ mm}$

* Le signe moins indique que la valeur d'adhérence est augmentée

L'adhérence moyenne de la glace sur le produit D est de $0,106 \pm 0,022$ MPa. Le revêtement augmente donc l'adhérence de la glace sur l'aluminium de 29%. Avec le nombre de cycles glaçage/déglaçage, l'adhérence reste pratiquement constante.

La rugosité du produit D augmente avec le nombre de déglacages. Par contre, cette augmentation reste discutable étant donné la très grande variation de la rugosité (de 7,3 à 3,7 μm), mesurée après 8 déglacages. Lorsque la glace décolle de l'échantillon, des cristaux de glace restent accrochés à quelques endroits sur la surface du recouvrement, ce qui contribue à l'endommager et à en modifier la rugosité.

Pour sa part, l'angle de contact diminue avec l'utilisation du produit D. Donc, lorsque le produit D est déglacé à répétition, l'adhérence tend à être constante tandis que l'hydrophobicité diminue.

4.3.5 Le revêtement H

Les résultats obtenus pour le revêtement H sont montrés à la **Figure 4.6, 4.7** et au **Tableau 4.6** décrit sommairement à la section 4.3.1.

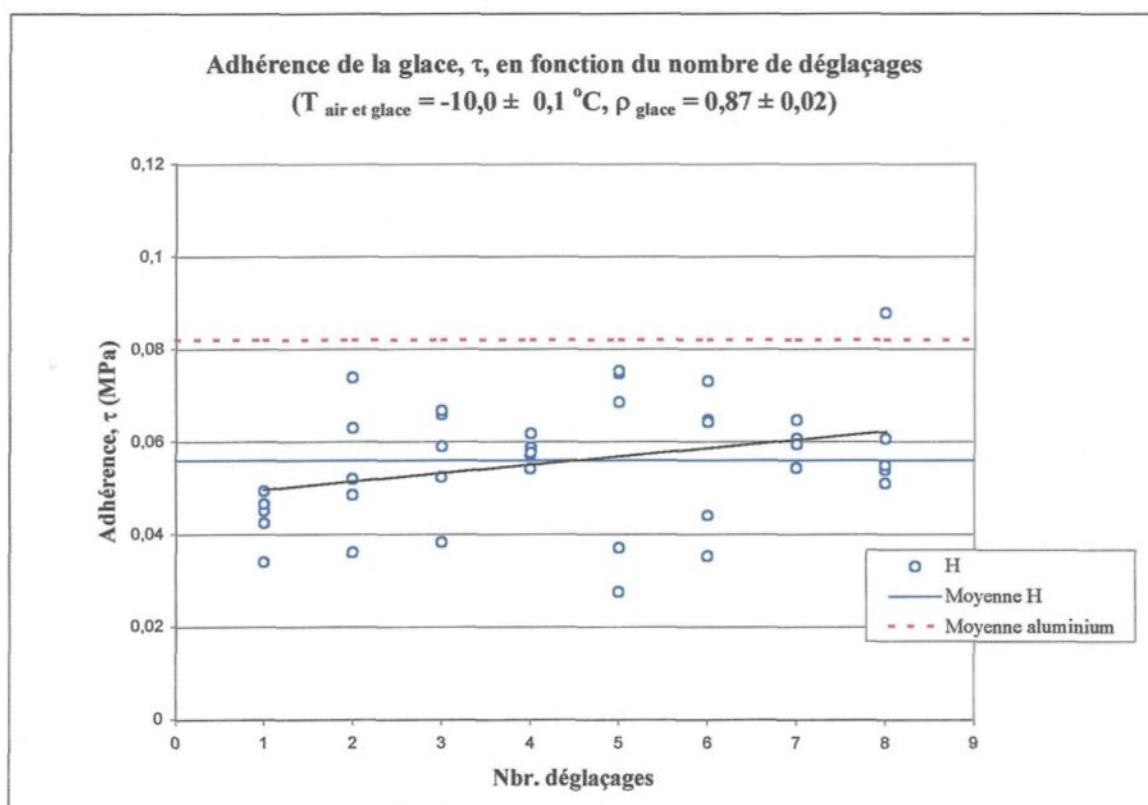
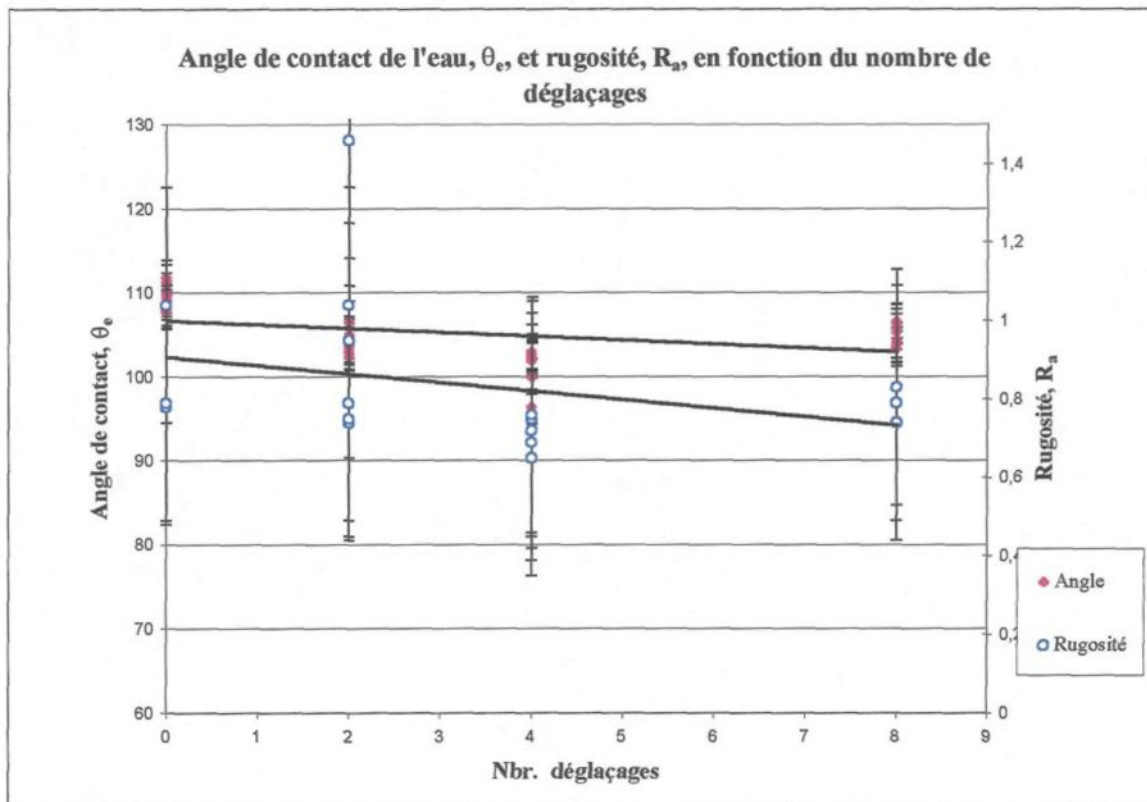


Figure 4.6 : Adhérence de la glace au revêtement **H**

Figure 4.7: Angle de contact et rugosité du revêtement **H**Tableau 4.6 : Caractéristiques moyennes du revêtement **H**

Caractéristiques	Valeurs et écart type (calculés avec les données des 8 déglacages)
Adhérence moyenne de la glace, $\bar{\tau}$ (Ruptures adhésives et cohésives) $T_{\text{air et glace}} = -10,0 \pm 0,1^\circ\text{C}$ $\rho_{\text{glace}} = 0,87 \pm 0,02$	$0,056 \pm 0,013 \text{ MPa}$
Pourcentage de réduction d'adhérence (par rapport à l'aluminium)	32 %
Rugosité moyenne, \bar{R}_a	$0,8 \pm 0,2 \mu\text{m}$
Angle de contact moyen de l'eau, $\bar{\theta}_e$	$105 \pm 3^\circ$
Taille moyenne des grains à l'interface glace/revêtement, \bar{d}_g	$0,43 \pm 0,05 \text{ mm}$

L'adhérence moyenne de la glace sur le produit H vaut $0,056 \pm 0,013$ MPa. Ce revêtement réduit donc l'adhérence de la glace par rapport à celle sur l'aluminium de 0,026 MPa, ce qui correspond à une réduction de l'adhérence de 32%. Toutefois, l'adhérence semble augmenter légèrement avec le nombre de déglacages subis par l'échantillon.

La rugosité du profil de surface du produit H reste pratiquement la même avec le nombre de déglacages. Par contre, le produit se détériore avec l'utilisation. La photographie de la surface, grossie 5 fois (**Figure 4.8**), montre l'état de la surface après 4 déglacages. Les cercles mettent en évidence deux endroits de la surface où le produit s'est décollé. Toutefois, cette détérioration du produit qui n'est pas visible à l'œil nu (et cela même après huit déglacages) ne semble pas influencer l'adhérence. À droite de cette même photographie, on peut également observer quelques cristaux de glace accrochés à la surface. Comme pour le produit A, on retrouve après le décollement des agrégats de petits cristaux de glace sphériques sur la surface du revêtement.

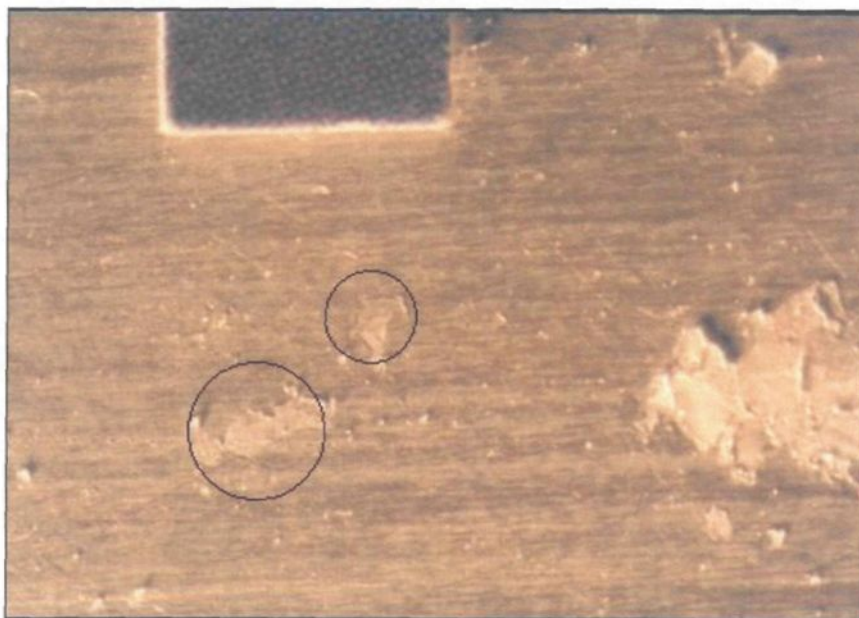


Figure 4.8 : Partie de la surface du produit H après 4 déglaçages
(Agrandie 5 fois)

L'angle de contact moyen de l'eau sur le revêtement H est de $105 \pm 3^\circ$. Cette mesure varie très peu avec le nombre de déglaçages. La variation de $5,6^\circ$ est à peine plus élevée que l'écart type de la moyenne. La faible détérioration observée en surface du revêtement n'a donc pas d'influence marquée sur son degré hydrophobicité.

4.3.6 Le revêtement L

Les résultats obtenus pour le revêtement L sont montrés à la **Figure 4.9, 4.10** et au **Tableau 4.7** décrit sommairement à l'introduction de cette section.

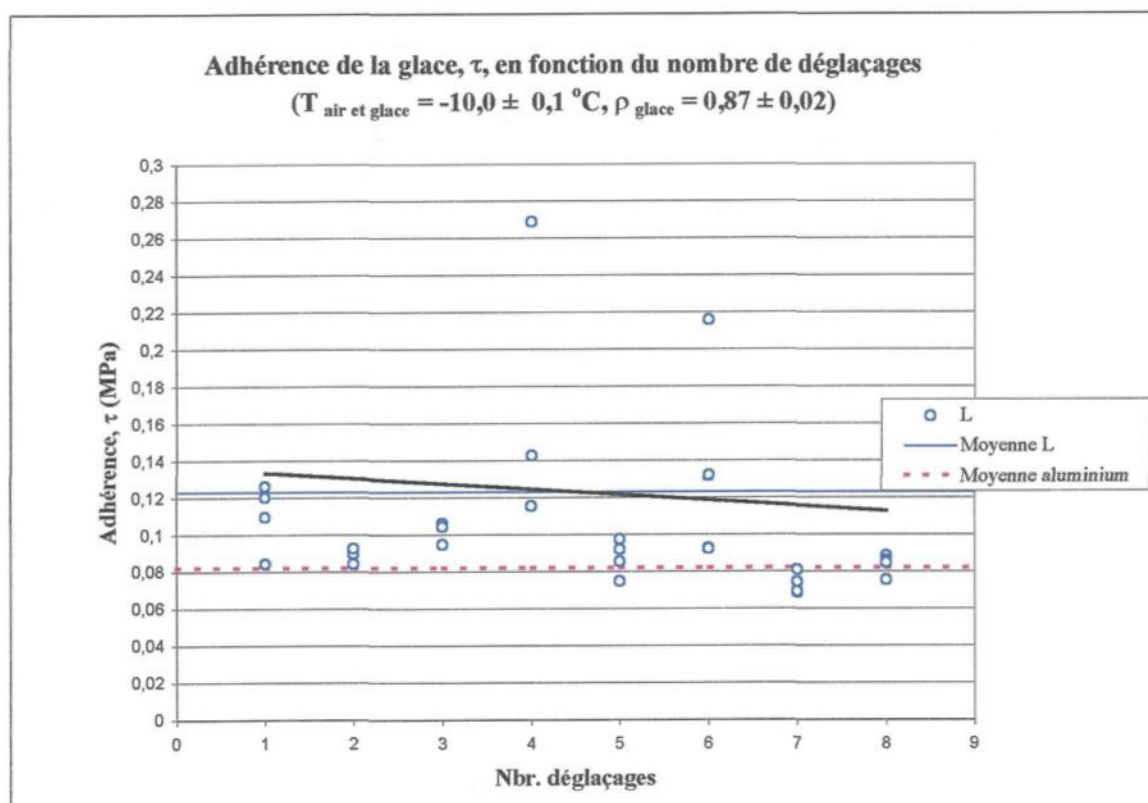


Figure 4.9 : Adhérence de la glace au revêtement L

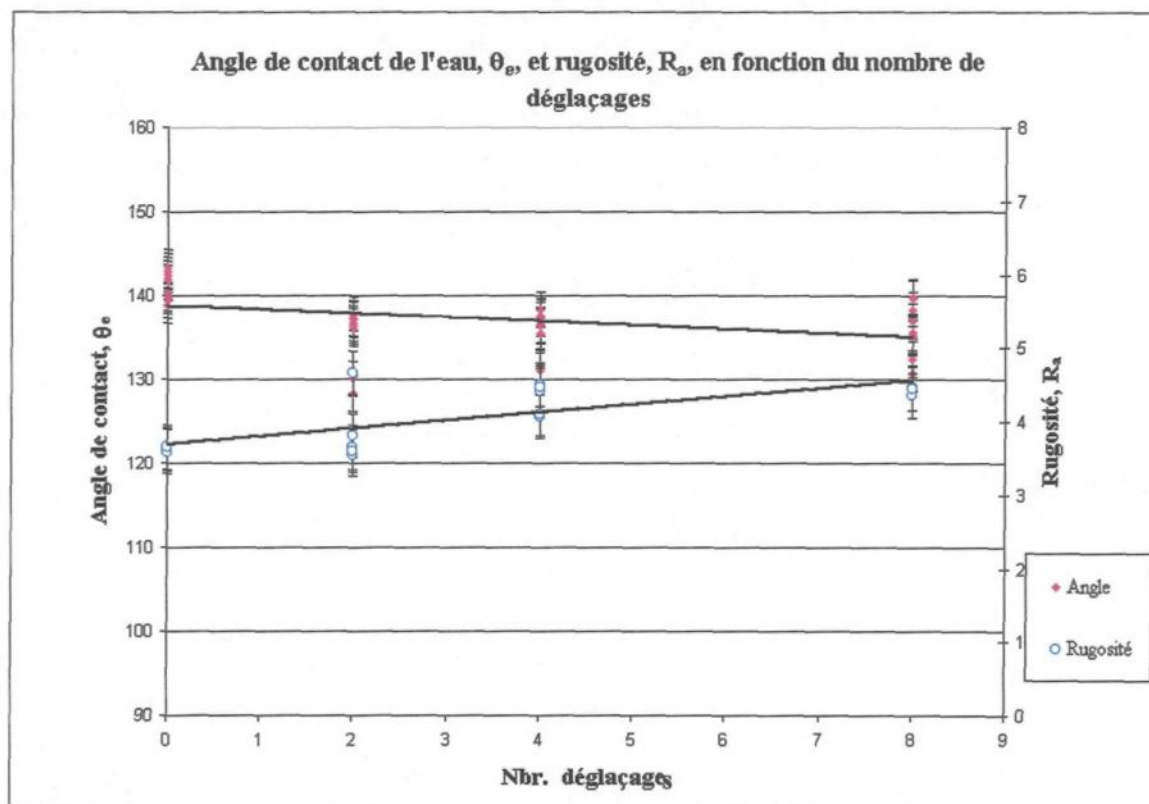


Figure 4.10: Angle de contact et rugosité du revêtement L

Tableau 4.7 : Caractéristiques moyennes du revêtement L

Caractéristiques	Valeurs et écart type (calculés avec les données des 8 déglacages)
Adhérence moyenne de la glace, $\bar{\tau}$ (Ruptures adhésives et cohésives) $T_{\text{air et glace}} = -10,0 \pm 0,1^\circ\text{C}$ $\rho_{\text{glace}} = 0,87 \pm 0,02$	$0,123 \pm 0,078 \text{ MPa}$
Pourcentage de réduction d'adhérence (par rapport à l'aluminium)	-50 %*
Rugosité moyenne, \bar{R}_a	$4,1 \pm 0,4 \mu\text{m}$
Angle de contact moyen de l'eau, $\bar{\theta}_e$	$137 \pm 4^\circ$
Taille moyenne des grains à l'interface glace/revêtement, \bar{d}_g	$0,42 \pm 0,08 \text{ mm}$

* Le signe moins indique que la valeur d'adhérence est augmentée

L'adhérence de la glace sur le revêtement vaut en moyenne $0,123 \pm 0,078$ MPa, soit une valeur de 50% plus grande que celle sur l'aluminium. Contrairement aux produits présentés précédemment, l'adhérence de la glace diminue avec le nombre de déglacages.

Avec ce revêtement, la rugosité augmente et l'angle de contact (hydrophobicité) diminue avec le nombre de déglacages. Comme pour le revêtement D, lors du décollement de la glace, des cristaux restent accrochés à plusieurs endroits sur la surface. La photographie de la surface du revêtement L, prise après un déglacage (**Figure 4.11**), montre deux morceaux de glace emprisonnés en surface.



Figure 4.11 : Partie de la surface du revêtement L après déglacages
(Agrandie 25 fois)

4.3.7 Le revêtement P

Les résultats relatifs au revêtement P sont présentés sous la même forme que les revêtements précédents dans les **Figure 4.12, 4.13** et le **Tableau 4.8**

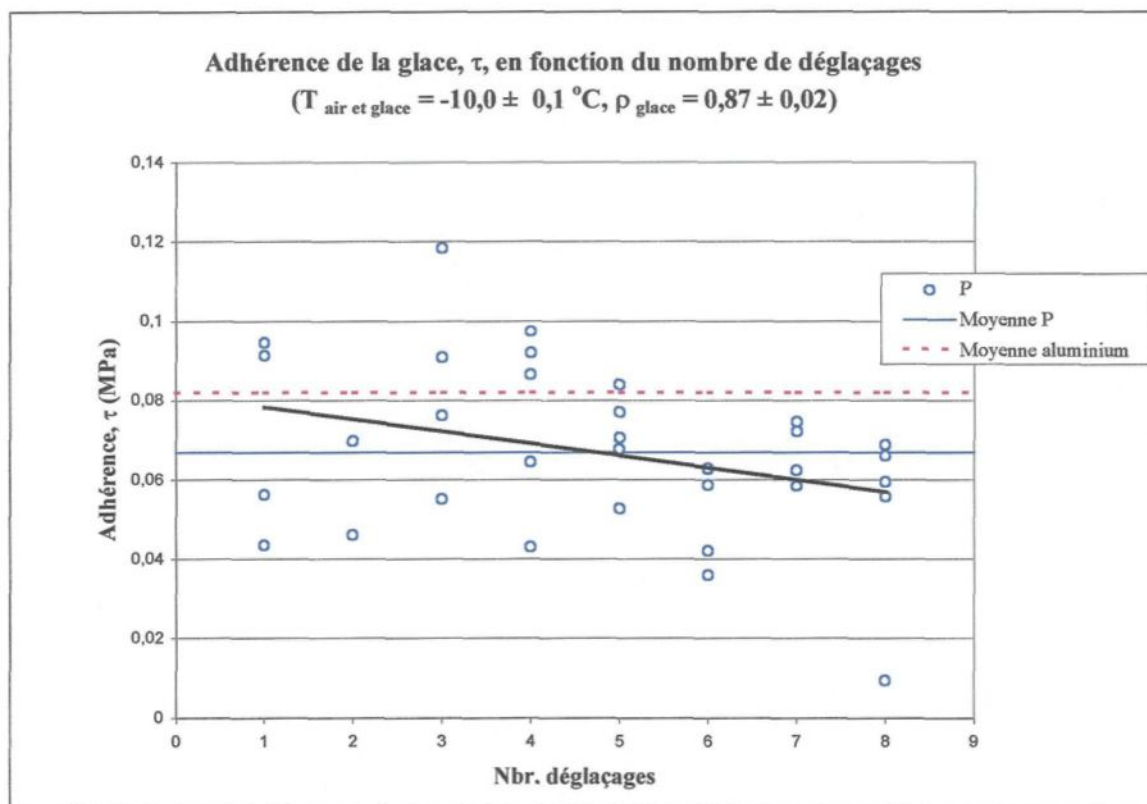


Figure 4.12 : Adhérence de la glace au revêtement P

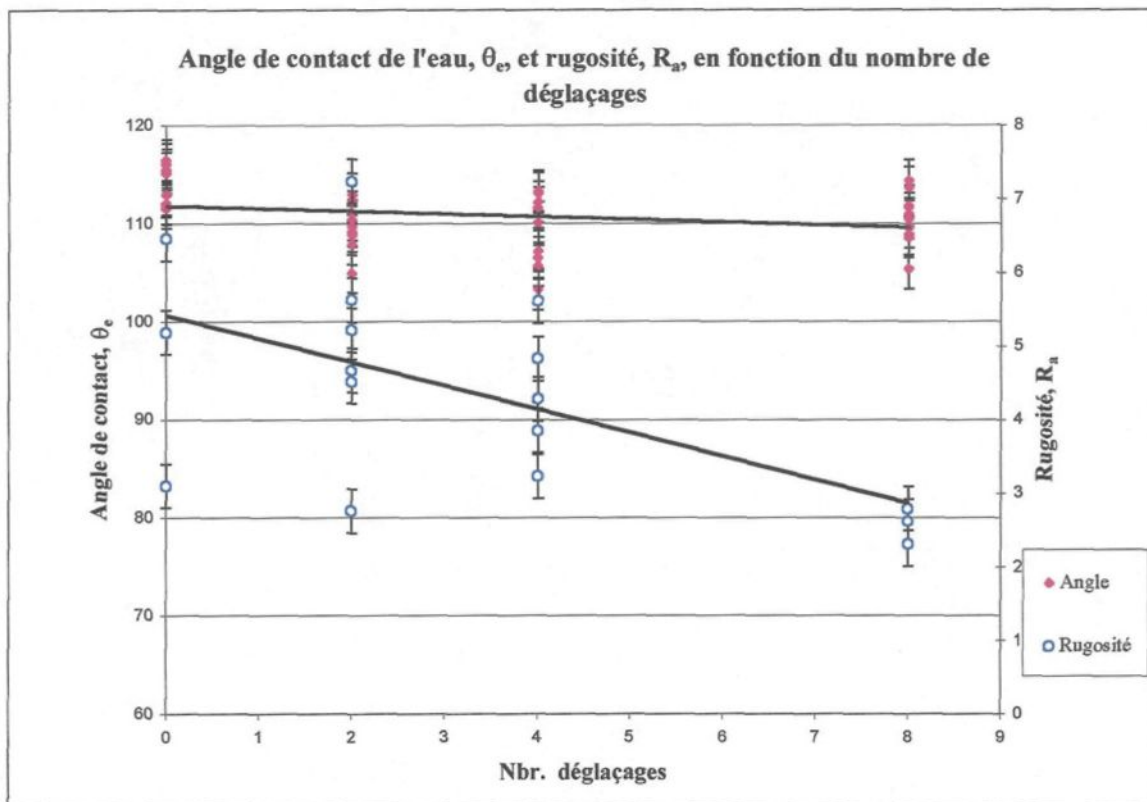


Figure 4.13: Angle de contact et rugosité du revêtement P

Tableau 4.8 : Caractéristiques moyennes du revêtement P

Caractéristiques	Valeurs et écart type (calculés avec les données des 8 déglacages)
Adhérence moyenne de la glace, $\bar{\tau}$ (Ruptures adhésives et cohésives) $T_{\text{air et glace}} = -10,0 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$ $\rho_{\text{glace}} = 0,87 \pm 0,02$	$0,067 \pm 0,021 \text{ MPa}$
Pourcentage de réduction d'adhérence (par rapport à l'aluminium)	18 %
Rugosité moyenne, \bar{R}_a	$4 \pm 1 \mu\text{m}$
Angle de contact moyen de l'eau, $\bar{\theta}_e$	$111 \pm 3^{\circ}$
Taille moyenne des grains à l'interface glace/revêtement, \bar{d}_g	$0,6 \pm 0,2 \text{ mm}$

Le produit P est le seul produit qui n'est pas solide. Le produit est mou mais est rugueux au toucher. L'adhérence moyenne de la glace sur ce revêtement est de $0,067 \pm 0,021$ MPa. Le pourcentage de réduction de l'adhérence relatif à aluminium est de 18%. Pour chaque essai de déglacage, les valeurs d'adhérence mesurées présentent une fluctuation élevée. Même avec ces écarts qui atteignent 31%, on peut percevoir une tendance de l'adhérence à diminuer en fonction du nombre de déglacages.

Pour sa part, la rugosité diminue avec le nombre de déglacages alors que l'angle de contact, est pratiquement constant. Lors du décollement, très peu de glace reste accrochée à la surface. Seuls quelques petits cristaux y restent accrochés. Les cristaux de glace sur la surface sont beaucoup moins nombreux que sur les autres échantillons. Le décollement de la glace provoque une perte de produit visible à l'œil nu. La **Figure 4.14** montre une image de la surface photographiée après quatre glaçages. Sur celle-ci, on peut voir nettement les parties du produit où le recouvrement est décollé de l'aluminium.



Figure 4.14 : Partie de la surface du revêtement P après 4 déglacages
(Agrandie 5 fois)

Au terme de 8 déglacages, le produit est encore présent sur l'échantillon dans une proportion d'environ trois quarts de la surface. La perte du produit semble donc se faire graduellement en cours des utilisations.

4.3.8 Le revêtement S

Les résultats obtenus pour le revêtement S sont montrés sous la même forme que les autres revêtements aux **Figure 4.15, 4.16** et au **Tableau 4.9**.

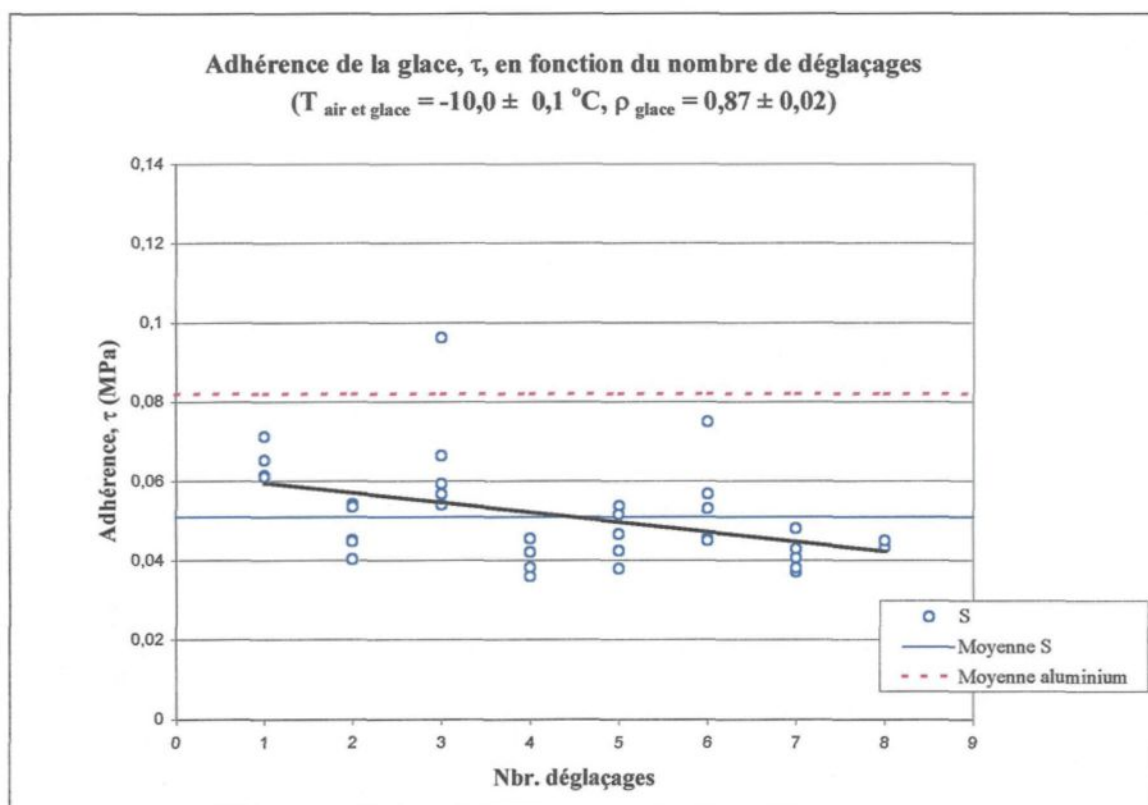


Figure 4.15 : Adhérence de la glace au revêtement S

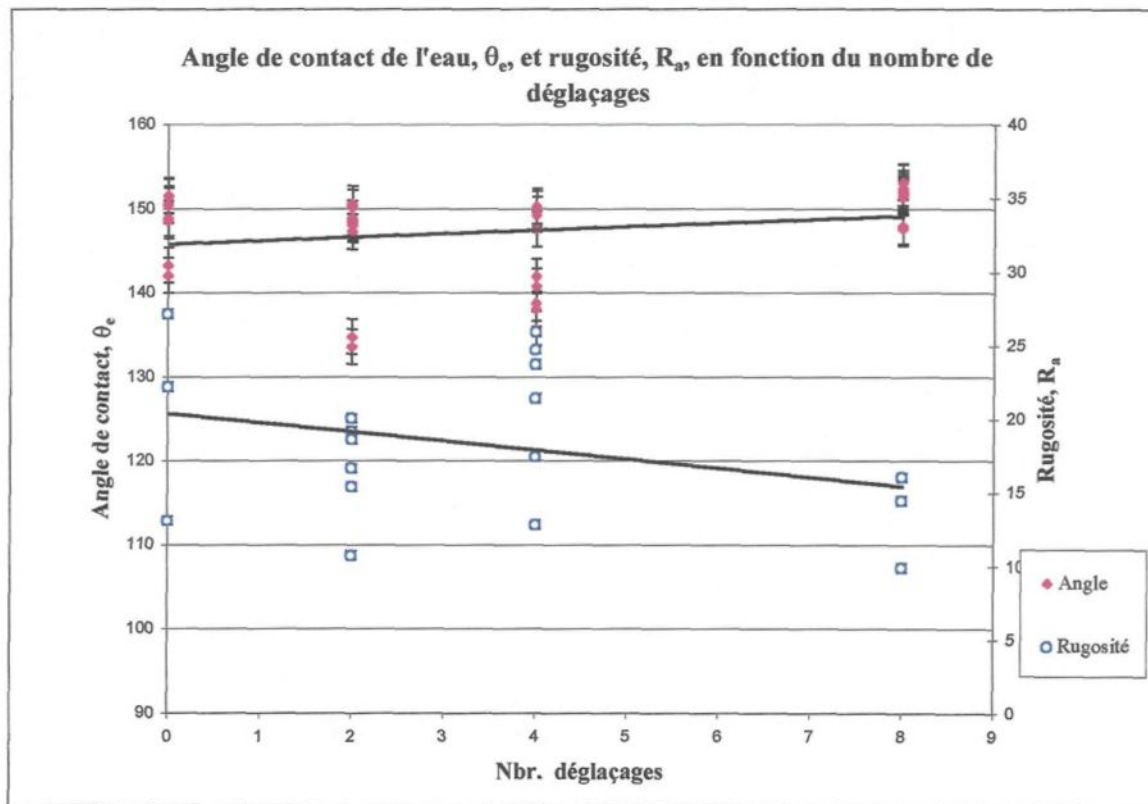


Figure 4.16: Angle de contact et rugosité du revêtement S

Tableau 4.9 : Caractéristiques moyennes du revêtement S

Caractéristiques	Valeurs et écart type (calculés avec les données des 8 déglacages)
Adhérence moyenne de la glace, $\bar{\tau}$ (Ruptures adhésives et cohésives) $T_{\text{air et glace}} = -10,0 \pm 0,1^\circ\text{C}$ $\rho_{\text{glace}} = 0,87 \pm 0,02$	$0,051 \pm 0,013 \text{ MPa}$
Pourcentage de réduction d'adhérence (par rapport à l'aluminium)	37 %
Rugosité moyenne, \bar{R}_a	$18 \pm 5 \mu\text{m}$
Angle de contact moyen de l'eau, $\bar{\theta}_e$	$147 \pm 5^\circ$
Taille moyenne des grains à l'interface glace/revêtement, \bar{d}_g	$0,23 \pm 0,03 \text{ mm}$

D'après la courbe de la **Figure 4.15**, le produit S réduit l'adhérence de la glace de 37%. En effet, l'adhérence vaut en moyenne $0,051 \pm 0,013$ MPa et diminue légèrement avec le nombre de déglacages.

La rugosité initiale de ce produit valant $21 \mu\text{m}$ est très élevée. Cette valeur est diminuée à $16 \mu\text{m}$ après 8 déglacages mais demeure la plus élevée de tous les revêtements. L'angle de contact de l'eau sur le revêtement S est également le plus élevé avec une valeur de 147° et n'a pas diminué après 8 déglacages. Contrairement aux autres revêtements sur lesquelles des morceaux de glace restent collés après la rupture, dans ce cas ci, le revêtement se détache et reste collé à la glace. En effet, lorsqu'on regarde la surface du morceau de glace décollé, on voit des taches blanches du revêtement recouvrant la glace.

Une photographie de la surface de l'échantillon après 4 déglacages (**Figure 4.17**) montre que le revêtement a été arraché lors du décollement.



Figure 4.17 : Partie de la surface du revêtement S après 4 déglacages
(Agrandie 5 fois)

4.3.9 Le revêtement W

Pour finir, voici les résultats relatifs au revêtement W. De la même façon que les revêtement précédents, il sont montrés aux **Figure 4.18**, **4.19** et au **Tableau 4.10**.

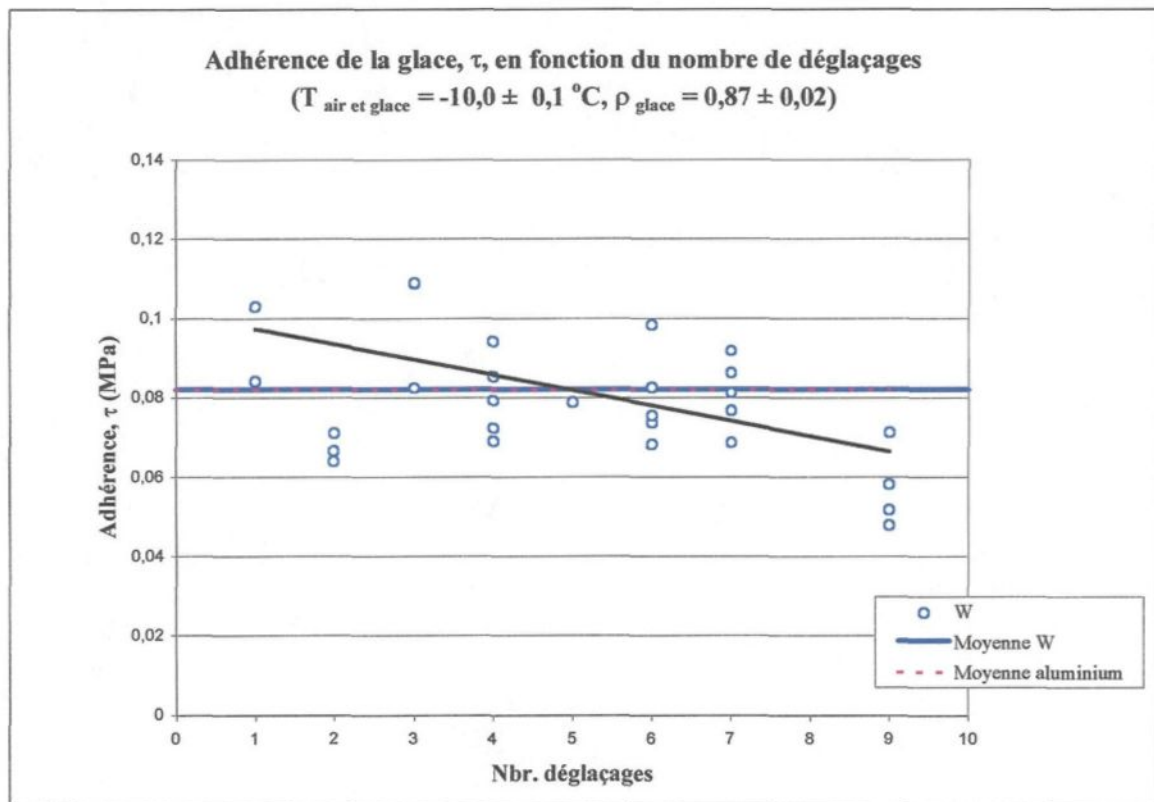


Figure 4.18 : Adhérence de la glace au revêtement W

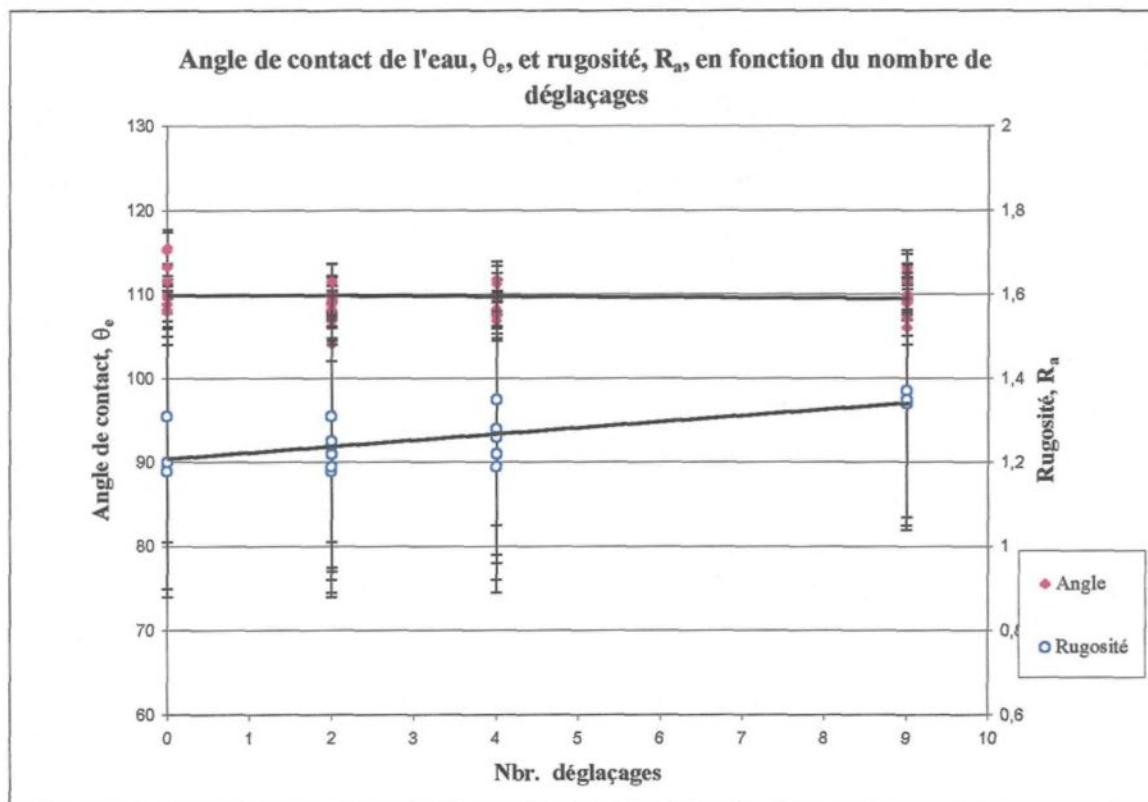


Figure 4.19: Angle de contact et rugosité du revêtement W

Tableau 4.10 : Caractéristiques moyennes du revêtement W

Caractéristiques	Valeurs et écart type (calculés avec les données des 9 déglacages)
Adhérence moyenne de la glace, $\bar{\tau}$ (Ruptures adhésives et cohésives) $T_{\text{air et glace}} = -10,0 \pm 0,1^\circ\text{C}$ $\rho_{\text{glace}} = 0,87 \pm 0,02$	$0,082 \pm 0,023 \text{ MPa}$
Pourcentage de réduction d'adhérence (par rapport à l'aluminium)	0 %
Rugosité moyenne, \bar{R}_a	$1,26 \pm 0,06 \mu\text{m}$
Angle de contact moyen de l'eau, $\bar{\theta}_e$	$110 \pm 2^\circ$
Taille moyenne des grains à l'interface glace/revêtement, \bar{d}_g	$0,6 \pm 0,3 \text{ mm}$

L'adhérence moyenne de la glace sur le revêtement W est la même que celle de l'aluminium, c'est à dire 0,082 MPa. L'écart type de 0,023 MPa des valeurs est du même ordre de grandeur que celui mesuré pour l'aluminium. Comme pour les revêtements L, P et S, l'adhérence de la glace diminue légèrement avec le nombre de déglacages subit par l'échantillon.

4.3.10 Analyse comparative des pourcentages de réduction de l'adhérence des revêtements

Les valeurs d'adhérence de la glace et l'effet du nombre de déglacages de chaque produit sont maintenant connues. Une synthèse des résultats permet une comparaison de la performance des revêtements à réduire l'adhérence est donnée au **Tableau 4.11**. Ce tableau présente les adhérences moyennes à la glace, les pourcentages de réduction des sept revêtements classés en ordre du plus élevé au moins élevé ainsi que l'énergie d'adhérence. Le calcul de cette énergie est effectué avec une relation utilisant la valeur de la contrainte de cisaillement moyenne nécessaire au décollement considérant les propriétés mécaniques et physiques des échantillons. Cette dernière relation a été développée à partir du modèle d'une poutre composite en flexion servant à calculer l'adhérence de la glace (Blackburn, C., 2000). D'après ce modèle, l'énergie d'adhérence est la différence d'énergie de l'effort tranchant dans la partie inférieure et supérieure de la poutre qui est attribuable à la différence des déformations angulaires de la glace et de l'aluminium. La formule algébrique utilisée pour ce calcul est donnée à l'**ANNEXE 4**. De plus, la dernière colonne

4.4 Dégradation par rayonnements UV

4.4.1 Introduction

Pour observer l'effet d'une exposition aux rayons UV les échantillons ont été photographiés de même que quelques propriétés ont été mesurées avant et après dégradation tel que la masse, l'épaisseur, la rugosité, et l'angle de contact. D'après l'état des surfaces mesurées en fonction du nombre de déglacages, il est possible de prédire l'efficacité à long terme du revêtement.

Ce test de dégradation simule la détérioration causée par le rayonnement du soleil. Cependant, la vitesse de dégradation dans un environnement naturel varie d'année en année. La dégradation en laboratoire est de nature plus constante. Donc, il est très difficile de connaître exactement combien d'heures d'exposition en laboratoire correspondent à un nombre d'heures à l'extérieur. Pour permettre une certaine relation, on doit connaître la valeur de plusieurs paramètres mesurés dans les deux situations. Cette relation sera valide seulement pour le site étudié.

Étant donné la nature comparative du projet de recherche, la relation entre les heures d'expositions intérieures et extérieures n'a pas été déterminée. Les résultats seront interprétés par comparaison. Par contre, si un revêtement démontrait une efficacité assez élevée pour permettre une application à grande échelle, des tests plus avancés de

dégradations seraient nécessaires. Cependant, pour effectuer une première comparaison entre différents revêtements, un test comparatif comme celui utilisé est approprié.

4.4.2 Propriétés mesurées avant et après exposition aux UV

Le **Tableau 4.12** contient les paramètres de l'exposition ainsi que les principales propriétés mesurées. La deuxième colonne du tableau donne la perte de masse. Cette dernière correspond à la moyenne des différences des masses avant et après mesurées sur les quatre morceaux exposés aux UV.

La troisième colonne correspond à la différence moyenne d'épaisseur calculée de la même façon que la différence de masse. Pour chaque échantillon, la mesure d'épaisseur a été effectuée 6 fois au même endroit pour obtenir une valeur moyenne et un écart type. Ces nombreuses mesures sont prises dans le but de déterminer la valeur statistique des données. Lorsque la différence calculée est plus petite que son écart type, elle devient négligeable. Il est à noter que les mesures d'épaisseur du A et du H sont manquantes car leurs épaisseurs sont plus petites que 5 μm . Les flèches indiquent le sens de la différence.

La quatrième colonne correspond aux différences de rugosité avant et après exposition. Le calcul s'effectue avec la rugosité initiale moyenne (celle citée dans les tableaux du chapitre 3 présentant les revêtements) tandis que la rugosité après exposition a été obtenue en

moyennant trois valeurs de rugosités mesurées sur un morceau exposé. Lorsque la différence calculée est plus petite que son écart type, elle devient négligeable.

Enfin, la cinquième colonne donne la valeur de la différence des angles de contact qui est présenté de la même façon que pour la rugosité. L'angle de contact initial est celui cité dans le chapitre 3 et celui final est celui obtenu en faisant la moyenne de dix valeurs d'angles mesurées sur un morceau exposé.

Tableau 4.12 : Propriétés mesurées avant et après exposition aux UV

Temps d'exposition total : 670,5 heures (27.9 jours) Température moyenne de la chambre : 48 °C				
Produits	Perte de masse (g)	Dif. moy. d'épaisseur* (μm)	Dif. moy. rugosité, R_a (μm)	Dif. moy. angle de contact, θ_c, (°)
S	0,02	↓ 14 ± 13	négligeable	Négligeable
H	0,00	-----	négligeable	↑ 29 ± 11
P	0,01	négligeable	↓ 3,33 ± 1,98	négligeable
A	0,00	-----	négligeable	↑ 100 ± 6
W	0,02	négligeable	↑ 0,60 ± 0,08	↑ 26 ± 12
D	0,00	négligeable	↑ 1,59 ± 1,37	négligeable
L	0,00	négligeable	↑ 0,58 ± 0,16	↑ 5 ± 3

*Mesuré avec un appareil *Elcometer 300, coating thickness gauge, A300FNB23, No série KH041*

Lors de la caractérisation visuelle et par photographie, seulement deux produits présentent des signes visibles de changement. Le premier est le W. La couleur du produit s'est modifiée en devenant plus jaune (**Figure 4.20**). Le deuxième est le produit S. Dans les endroits où la couche d'apprêt n'est pas recouverte de poudre, la couleur a passé de translucide à jaune (**Figure 4.21**).

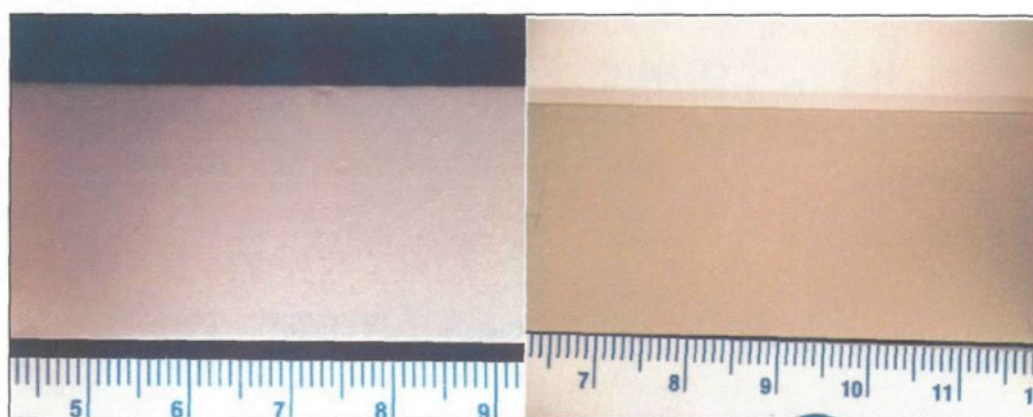


Figure 4.20 : W avant (à gauche) et après (à droite) expositions aux UV

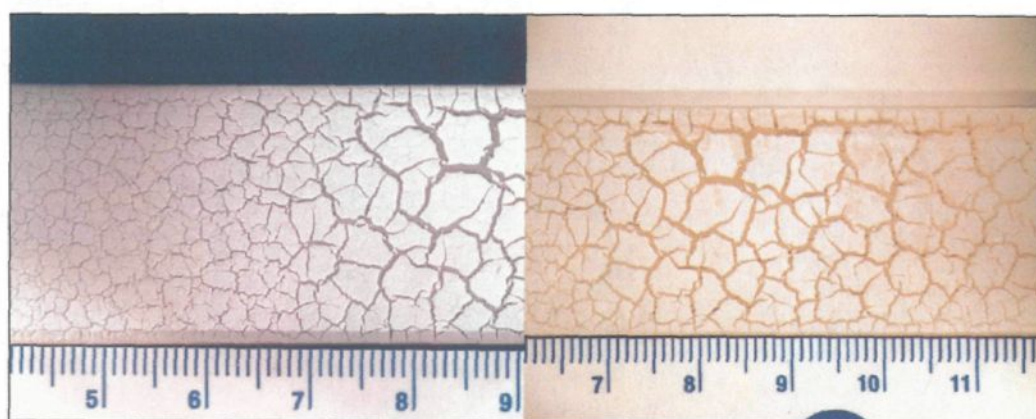


Figure 4.21 : S avant (à gauche) et après (à droite) expositions aux UV

Le revêtement le plus efficace à réduire l'adhérence, le produit S, résiste relativement bien aux rayonnements UV. Après une exposition de 27,9 jours, le revêtement a perdu seulement 0,02 g de masse. Cette quantité représente environ 0,04% de la masse initiale. Donc, malgré le jaunissement de la couche d'apprêt, le produit demeure pratiquement le même. Si on compare l'ampleur des dommages produits par les déglacages à ceux produits par les rayonnements UV, on peut prédire que si le revêtement S est utilisé sur une longue période, la détérioration visible sera surtout provoquée par les déglacages successifs et non pas par les rayonnements UV. Avec le temps, il faut s'attendre à ce que le produit perde sa consistance et que l'adhérence de la glace va diminuer. Toutefois, lorsque toute la poudre sera partie, l'adhérence va subitement augmenter jusqu'à celle de l'aluminium non protégé.

Le deuxième produit analysé est le H. L'exposition au UV n'a pas d'effet significatif sur la rugosité mais produit une augmentation de l'angle de contact de $29^\circ \pm 11^\circ$. Tandis que lorsque le produit subit des déglacages successifs, l'angle de contact a réagit à l'inverse en diminuant. Il est donc difficile de prévoir un comportement à long terme lors d'une réelle utilisation.

Le produit P subit une perte de rugosité considérable de $3,3 \pm 2,0 \mu\text{m}$ et une très légère perte de masse de 0,01g lors de l'exposition aux UV. Lors des déglacages successifs, l'adhérence de la glace diminue ainsi que la rugosité. Donc, on peut prévoir que lors de l'utilisation à long terme de ce revêtement, l'adhérence de la glace va diminuer progressivement avec le nombre de déglacages et cette diminution sera accélérée lors des

fortes périodes d'ensoleillement. Cette diminution d'adhérence sera présente jusqu'au moment où le produit sera entièrement arraché de la surface.

Le produit hydrophile A exposé aux rayonnements UV perd entièrement son hydrophilie et devient même hydrophobe. Lors des tests d'adhérence une augmentation marquée de l'angle de contact a également été mesuré. L'augmentation subite de l'angle de contact n'influençant pas l'adhérence à ce moment, on peut prévoir qu'une exposition aux rayonnements UV n'aura pratiquement pas d'influence sur l'adhérence. L'adhérence de la glace sera principalement influencée par le nombre déglaçages.

Les trois derniers revêtements étudiés W, D et L sont tous des revêtements solides et rigides. Les trois produits farinent lorsqu'ils sont soumis aux rayonnements UV. Le farinage est une altération d'un revêtement qui libère de fines poussières peu adhérentes. Dans le cas présent, le farinage se traduit principalement par une augmentation de la rugosité et par conséquent une augmentation proportionnelle de l'angle de contact. Le produit W est celui qui a le plus fariné. En plus de son changement de couleur et d'une perte de masse de 0,02 g, la rugosité augmente considérablement ($0,60 \pm 0,08 \mu\text{m}$ sur une rugosité initiale de $1,23 \mu\text{m}$) ainsi que l'angle de contact qui a augmenté de 26° . Le produit L présente également une augmentation de rugosité et de l'angle de contact. Pour finir, le produit D montre un très léger farinage n'affectant pas l'angle de contact.

Lors des déglacages successifs, on a observé par l'augmentation de la rugosité et de l'angle de contact un léger de degré de farinage. Le farinage produit par les déglacages successifs s'est traduit par une légère diminution de l'adhérence de la glace sur les produits causée par la perte de consistance des surfaces. Donc, ces observations permettent de supposer que le farinage a pour effet de diminuer l'adhérence de la glace sur le revêtement jusqu'à la détérioration totale du produit. Le revêtement D sera donc le plus résistant aux déglacages, suivi du L et finalement le W.

CHAPITRE 5

DISCUSSION

5 DISCUSSION

5.1 Introduction

Dans cette section, les résultats d'adhérence obtenus sont d'abord discutés en les comparant avec ceux mesurés par d'autres auteurs. Ensuite, les principaux facteurs affectant l'adhérence seront discutés et utilisés pour établir le mécanisme jugé le plus probable pour expliquer l'adhérence de la glace.

5.2 L'adhérence de la glace aux revêtements

5.2.1 Comparaison des résultats obtenus avec ceux de la littérature

Les observations obtenues avec l'étude de ces sept produits commerciaux corroborent celles des auteurs cités dans la section 1.2.7 Artis (Artis, D. R., 1975), Anderson et Reich (Anderson, N. A., Reich, A. D., 1997) ainsi que celles des rapports du département des transports des États-Unis (Westmark, P., et al., 1997) et de l'EPRI (Baum, B., et al., 1996). Aucune substance étudiée ne diminue considérablement l'adhérence de la glace et aucune ne possède une efficacité durable.

L'adhérence de la glace est une mesure qui dépend de beaucoup de facteurs (sections 1.2.3 et 1.2.4). Donc, on peut s'attendre à trouver un écart significatif entre les valeurs mesurées par différents auteurs. Par contre, il est intéressant de comparer le degré de diminution

d'adhérence mesuré sur les échantillons recouverts de revêtements. Voici un tableau comparatif (**Tableau 5.1**) des valeurs d'adhérence mesurées par trois groupes d'auteur sur l'aluminium et sur leurs meilleurs revêtements.

Tableau 5.1 : Résultats d'adhérence de différents auteurs

Auteur (Référence)	Yoshida, M., et al., 1991	Baum, B., et al., 1996 (Préparé pour l'EPRI)	Anderson, N. A., Reich, A. D., 1997
Température, T_a	Non mentionnées	- 10 °C	Non mentionnées
τ Aluminium (MPa)	0,225	1,26	0,83
τ meilleurs revêtements (MPa)	$\approx 0,120$	$\approx 0,01$ à 0,42	$\approx 0,39$
Coefficient de réduction	0,47	De 126 à 3	0,53

Les revêtements étudiés par les équipes de Yoshida et Anderson diminuent d'environ 0,5 la valeur d'adhérence à l'aluminium. Ces résultats se comparent à ceux obtenus dans cette étude où le revêtement le plus efficace réduit l'adhérence d'un facteur de 0,37. Par contre, Baum et ses coéquipiers ont étudié des revêtements jusqu'à 100 fois plus efficaces. Ces revêtements sont principalement des silicones et d'autres types d'élastomères très flexibles. Parmi ces revêtements, seulement un a été retenu après l'étude de leur durabilité. Le silicone retenu diminue d'environ 31 fois l'adhérence à l'aluminium mais est très dispendieux. Sur quatre-vingt-dix revêtements étudiés, vingt-sept réduisent l'adhérence d'un facteur plus élevé que 5. Il est à noter que l'adhérence de la glace à l'aluminium a été

mesurée directement sur la partie d'un câble toronné d'aluminium. L'adhérence ainsi mesurée est beaucoup plus élevée que celle mesurée sur une surface lisse. Par le fait même, les facteurs de réduction sont plus élevés.

En général, on observe que les valeurs d'adhérence mesurées par ces trois groupes d'auteurs sont dix fois plus élevées que celles présentées dans ce travail. Cet écart est peut-être attribuable au mode déformation utilisé. Le fait d'utiliser un cisaillement produit par la flexion du substrat favorise peut-être le décollement comparativement à des essais de tension ou par cisaillement produit par glissement du substrat, ce qui peut provoquer beaucoup de friction.

5.2.2 L'erreur sur la mesure d'adhérence

Les causes d'erreurs relatives aux mesures adhérences sont très nombreuses. Elles sont principalement causées par l'instrumentation. Pour les présents travaux, l'adhérence a été mesurée avec un appareil utilisant l'énergie créée par la flexion d'une poutre pour décoller la glace du revêtement. Pour les calculs du cisaillement, il a fallu utiliser des modèles mathématiques qui comportent des approximations. Par exemple, on suppose que l'interface glace/revêtement se situe à l'axe neutre de la poutre composite pour qu'elle subisse seulement un cisaillement. En réalité, l'axe neutre se situe à ± 1 mm de l'interface. Ce genre d'erreur ou d'approximation provoquent des fluctuations de l'ordre du milliè

de MPa. Cependant, l'adhérence de la glace étant très variable en soit (parce qu'il fait intervenir plusieurs facteurs), l'écart des valeurs mesurées pour un revêtement est au moins dix fois plus élevé. Donc, les erreurs attribuables à l'instrumentation deviennent négligeables comparativement à la variabilité de l'adhérence. À titre d'exemple, l'erreur attribuable à l'instrumentation sur la mesure de l'adhérence de la glace à l'aluminium serait $0,082 \pm 0,005$ MPa. Cependant, la variation observée sur l'ensemble des mesures prises sur l'aluminium $\pm 0,026$ MPa soit cinq fois plus grande. Pour augmenter la précision de nos résultats, une augmentation du nombre de mesures d'adhérence par revêtement serait nécessaire. Cependant, la présence d'une grande variabilité sera toujours présente car l'adhérence de la glace dépend de plusieurs facteurs qui ne sont pas toujours connus ou difficilement contrôlables.

5.3 Les facteurs influençant l'adhérence

5.3.1 L'hydrophobicité

Plusieurs auteurs supposent que l'augmentation de l'hydrophobicité, et par conséquent la diminution de l'énergie de surface, aura comme effet de diminuer l'adhérence de la glace. Cette supposition repose sur la théorie du modèle chimique décrite à la section 1.2.6. Pour étudier l'effet de l'hydrophobicité et l'énergie de surface sur l'adhérence de la glace, un graphique est présenté à la **Figure 5.1**. Deux séries de points y sont présentées. La première série (où les points sont des cercles vides) correspond à l'angle de contact en fonction de

l'adhérence. Ainsi, les coordonnées de chaque point correspondent à l'angle de contact moyen, $\bar{\theta}_e$, et à l'adhérence moyenne d'un produit, $\bar{\tau}$. Selon le même principe, la deuxième série (où les points sont des cercles pleins) correspond à l'énergie de surface en fonction de l'adhérence. Les valeurs des énergies de surfaces sont celles citées dans les tableaux présentant les caractéristiques initiales des revêtements du chapitre 2.

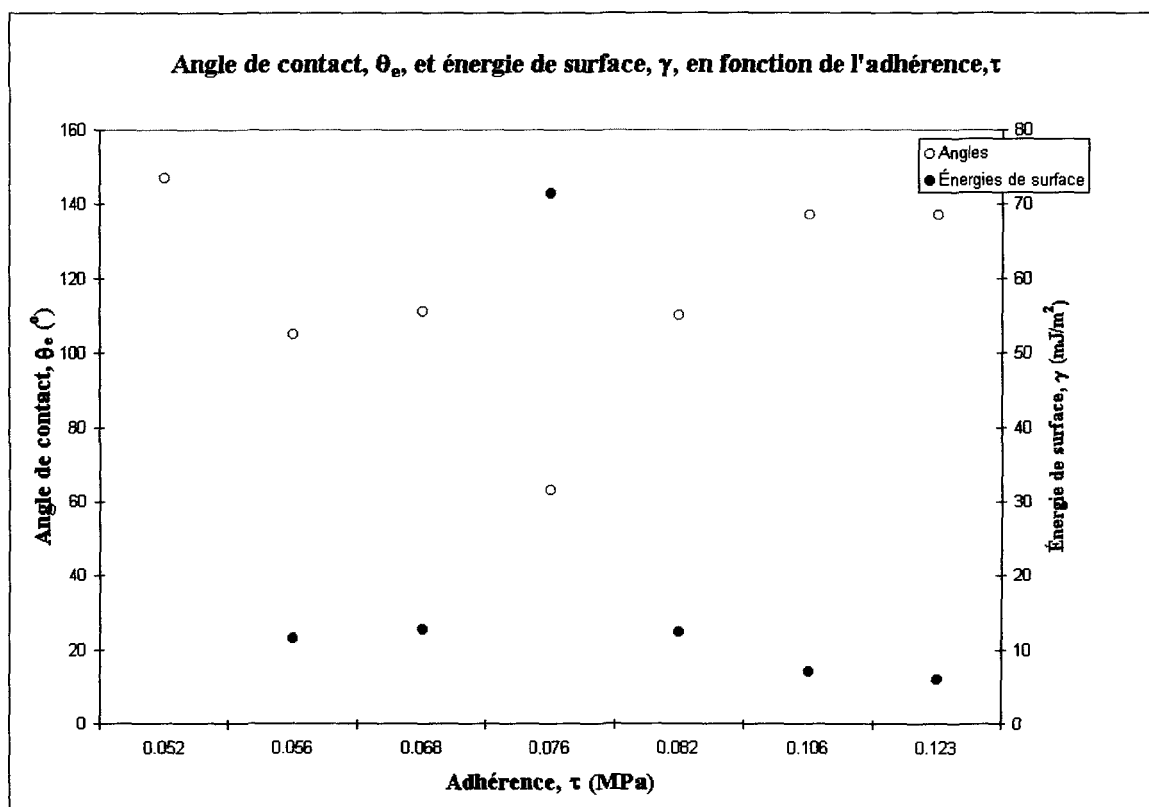


Figure 5.1 : Graphique de l'angle de contact et énergie de surface

Les deux séries de points ne correspondent pas à des droites linéaires. Il est impossible, d'après ces résultats, de conclure à une influence de l'angle de contact (énergie de surface)

sur la valeur d'adhérence de la glace. C'est à dire que dans ce graphique, lorsque l'adhérence augmente, il n'y a aucune diminution de l'angle de contact.

L'influence de l'hydrophobicité sur l'adhérence est encore fortement discutable. D'autres travaux étudiant l'angle de contact en fonction de l'adhérence ne concluent pas à une relation directe. Déjà au début des années soixante, Lliboutry (Lliboutry, L., 1962) ainsi que Porte et Nappier (Porte, H. A., Nappier, T. E., 1963) trouvent douteuse la relation proposée entre l'angle de contact (énergie de surface) et l'adhérence de la glace. Plus récemment, les mesures d'adhérence sur différents revêtements effectuées par Landy (Landy, M., 1992) démontrent une absence de relation. Également, lors de la recherche effectuée par la NASA et BF Goodrich (Anderson, N. A., Reich, A. D., 1997) pour trouver un revêtement glaciophobe, les auteurs concluent qu'un produit hydrophobe n'est pas nécessairement un produit à caractère glaciophobe.

Par contre quelques auteurs concluent à une corrélation entre l'hydrophobicité et l'adhérence. Même dans ces cas, la relation est nuancée et quelque fois limitée. Par exemple, Croucht et Hartley (Croucht, V. K., Hartley, R. A., 1992), qui ont également mesuré l'adhérence de la glace sur différents revêtements, arrivent à la conclusion qu'il existe un degré raisonnable de corrélation. Par contre, ce degré de corrélation s'applique seulement à un type de polymère et l'étendue des angles de contact étudiés est seulement de $63,2^{\circ}$ à $97,5^{\circ}$. Également, Yoshida et ses coéquipiers (Yoshida, M., et al., 1991) démontrent

une corrélation entre l'énergie de surface et l'adhérence mais cette relation est limitée à quelques substances.

La controverse entourant la question de l'influence de l'hydrophobicité sur l'adhérence de la glace est peut-être reliée au fait que la variation de l'hydrophobicité peut influencer d'autres propriétés importantes comme les propriétés mécaniques. Ensuite, le changement de ces autres propriétés peut amener un changement sur l'adhérence. Alors, la relation de l'adhérence avec l'hydrophobicité devient indirecte et valide seulement que pour certains types de polymères. Par exemple, Andersson et son équipe (Andersson, L., et al., 1994) ont étudié l'adhérence de la glace sur des caoutchoucs de différentes compositions. En modifiant la composition, ils obtenaient des caoutchoucs possédant différents angles de contact. Ils concluent à une corrélation entre l'hydrophobicité et l'adhérence. Plus l'angle de contact augmente, plus l'adhérence diminue (pour $\theta_c < 90^\circ$). Cependant, la modification de la composition des caoutchoucs engendre également un changement des valeurs de transition vitreuse (T_g). Donc, la variation de l'adhérence ne serait pas due seulement à l'augmentation de l'hydrophobicité.

5.3.2 La rugosité

Plusieurs études démontrent qu'il existe une relation entre le profil de surface (rugosité) et l'adhérence de la glace. Cette relation est expliquée par le modèle d'adhérence mécanique. Pour étudier cette dernière relation, deux produits ont été ignorés : le S et le P. La raison principale est qu'ils ne se comportent pas comme des véritables solides rigides, le premiers étant une poudre et le second un polymère viscoélastique. Pour cette raison, ils ne peuvent être comparés aux autres. Le graphique de la **Figure 5.2** qui suit montre la relation obtenue entre l'adhérence et la rugosité des cinq revêtements solides. Chaque point correspond aux valeurs moyennes d'adhérence et de rugosité d'un produit. La droite tracée avec les points correspond à une régression linéaire.

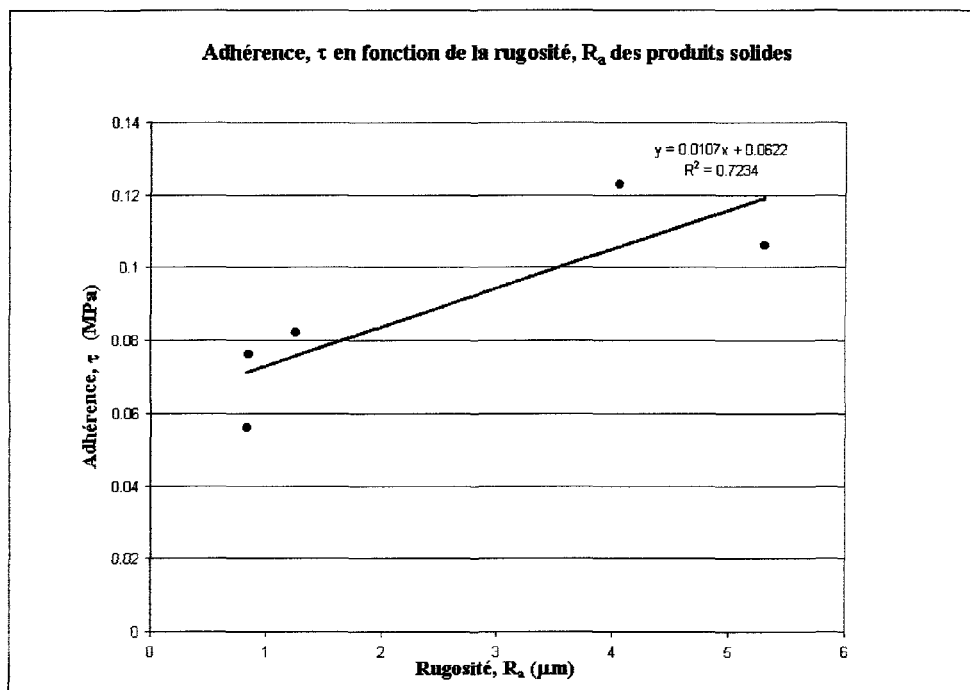


Figure 5.2 : Graphique de la rugosité de différents produits

Donc, pour les produits solides, il existe une relation de proportionnalité entre l'adhérence de la glace et la rugosité de la surface. En effet l'adhérence de la glace suit une relation linéaire avec la rugosité. La pente de la droite est égale à $0,011 \text{ MPa}/\mu\text{m}$ et l'ordonnée à l'origine égale $0,062 \text{ MPa}$. Le fait que la droite coupe l'axe des y une valeur différente de zéro indique que même sur une surface solide parfaitement lisse, la glace adhérerait avec une valeur considérable. Cependant, la faible valeur du coefficient de corrélation linéaire de $0,72$ démontre que la relation n'est pas parfaitement linéaire et que d'autres facteurs peuvent intervenir.

Dans le but d'approfondir l'analyse des derniers résultats, quelques tests supplémentaires ont été effectués. Les tests présentaient deux objectifs. Le premier est de déterminer si la relation linéaire est améliorée lorsque les mesures d'adhérence sont prises sur des surfaces de différentes rugosités mais sur le même produit possédant les mêmes propriétés mécaniques. Et le deuxième, est de déterminer si la relation est toujours valide lorsque les rugosités en jeu sont plus petites que $1 \mu\text{m}$. Pour ce faire, l'adhérence de la glace a été mesurée sur quatre poutrelles d'aluminium du même type que les échantillons sans recouvrement mais polies avec un fini miroir de rugosité variant de $1,02$ à $0,08 \mu\text{m}$. Pour chaque rugosité, l'adhérence a été mesurée et moyennée pour ensuite être mis sous graphique. La droite correspond à la régression linéaire.

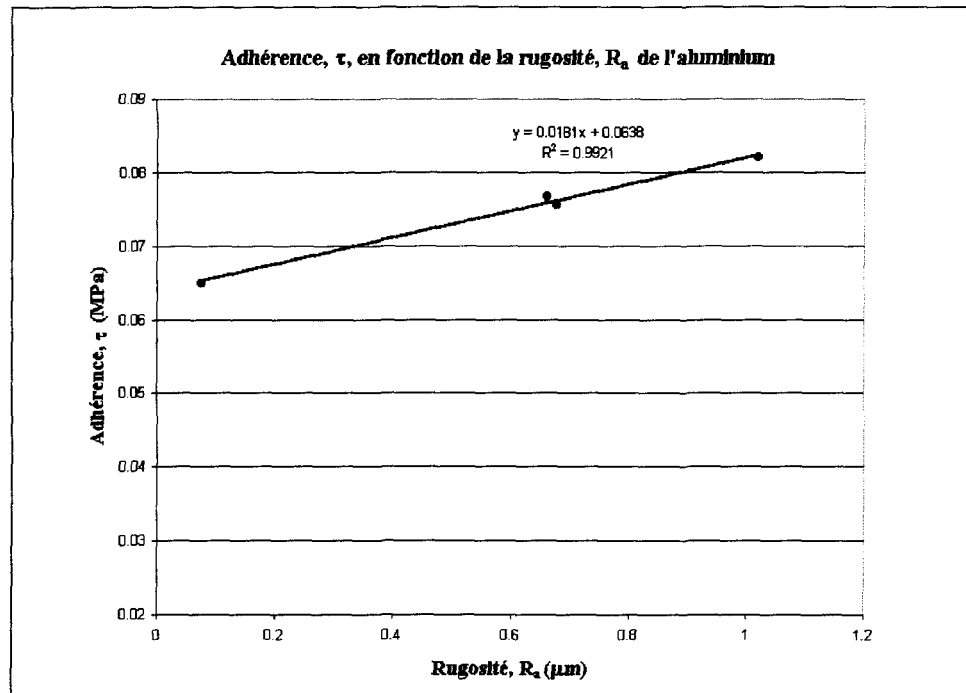


Figure 5.3 : Graphique des rugosités sur l'aluminium

Il existe une forte relation de proportionnalité entre la rugosité de l'aluminium poli et l'adhérence de la glace. La pente de cette droite est égale à 0,018 MPa/ μm et l'ordonnée à l'origine égale 0,064 MPa. Le coefficient de corrélation linéaire est de 0,9921. La droite obtenue l'aluminium poli est comparable à celle tracée à la **Figure 5.2** applicable aux revêtements solides. En effet, les pentes (0,011 et 0,018 MPa/ μm) ainsi que les ordonnées à l'origine (0,062 et 0,064 MPa) sont du même ordre de grandeur. Donc, l'adhérence de la glace sur l'aluminium varie en fonction de la rugosité de la même façon que sur les différents produits solides mais avec une dépendance plus marquée. Le fait que les rugosités étudiées sur l'aluminium soient inférieures à 1 μm ne semble pas avoir d'influence significative sur la pente et l'origine de la droite.

Donc, l'adhérence de la glace sur des revêtements rigides augmente de façon linéaire avec la rugosité. La même relation serait applicable sur un ensemble de différents revêtement solides où à un seul. Cependant, le coefficient de corrélation entre l'adhérence et la rugosité devrait être plus marqué lorsque l'adhérence est mesurée sur le même solide aux propriétés mécaniques constantes. Cette relation est valide pour des rugosités passant de $0,08\ \mu\text{m}$ à $5,3\ \mu\text{m}$.

En extrapolant cette dernière relation vers une rugosité nulle, on obtient une valeur d'adhérence de la glace considérable d'environ $0,063\ \text{MPa}$. Ce résultat semble élevé si on le compare avec les valeurs minimales mesurées sur le produit H, qui se situaient dans les environs de $0,030\ \text{MPa}$ (**Figure 4.6**) mais démontre tout même l'existence d'une forte adhérence sur un solide très lisse. Donc, le polissage des revêtements solides demeure une bonne façon de diminuer l'adhérence mais n'est pas suffisant pour l'annuler.

5.3.3 La taille des grains

Une autre propriété est influencée par la rugosité et peut également provoquer une augmentation de l'adhérence de la glace. Cette propriété intrinsèque à la glace est la grosseur des grains. Lors des tests d'adhérence, la taille des grains à l'interface a été mesurée et la moyenne citée dans les tableaux des caractéristiques des revêtements de la section 4.3. Dans la littérature, il n'existe aucune étude exhaustive faisant ressortir

l'influence de la taille des grains sur l'adhérence. Par contre, on peut s'attendre à ce que la taille des grains de glace ait une influence. En effet, il est connu que la taille des grains influence fortement les propriétés mécaniques de la glace. Le diamètre moyen des grains est un des paramètres utilisés pour le calcul des contraintes en tension et en compression de rupture de la glace. En général, plus la taille des grains est petite, plus la glace sera résistante (Michel, B., 1978)

Lors des tests d'adhérence, les ruptures observées sont majoritairement adhésives dans le sens où la glace se détache en un seul morceau. Par contre, même si la glace se détache en un seul morceau, une fine couche de glace demeure souvent collée à l'échantillon. Cette observation indique que la rupture réelle se fait, non pas à l'interface mais en partie dans la couche de glace près de l'interface. Donc, l'énergie nécessaire pour décoller la glace est en réalité divisée en deux catégories, la cohésive et l'adhésive. Lorsqu'une quantité de glace, même faible, reste collée à l'interface, la rupture est en réalité cohésive. L'énergie nécessaire est donc celle de la cohésion de la glace. Dès lors, cette énergie dépend de plusieurs facteurs, incluant la taille des grains. C'est pour ces raisons qu'on peut supposer une influence de la taille des grains de glace à l'interface lorsque que la rupture n'est pas parfaitement adhésive. Plus précisément, on suppose que plus la taille des grains est élevée, plus l'adhérence sera faible. La droite présentée à la **Figure 5.4** illustre cette influence. Chaque point du graphique correspond à l'adhérence de la glace à un revêtement, citées dans les tableaux du chapitre 4, et la taille moyenne des grains. Les produits A et S ne sont

pas inclus dans le graphique. Pour le premier, la taille moyenne des grains n'a pas été mesurée faute de bonnes photos. Et, pour le deuxième, aucune glace ne restait collé sur le revêtement.

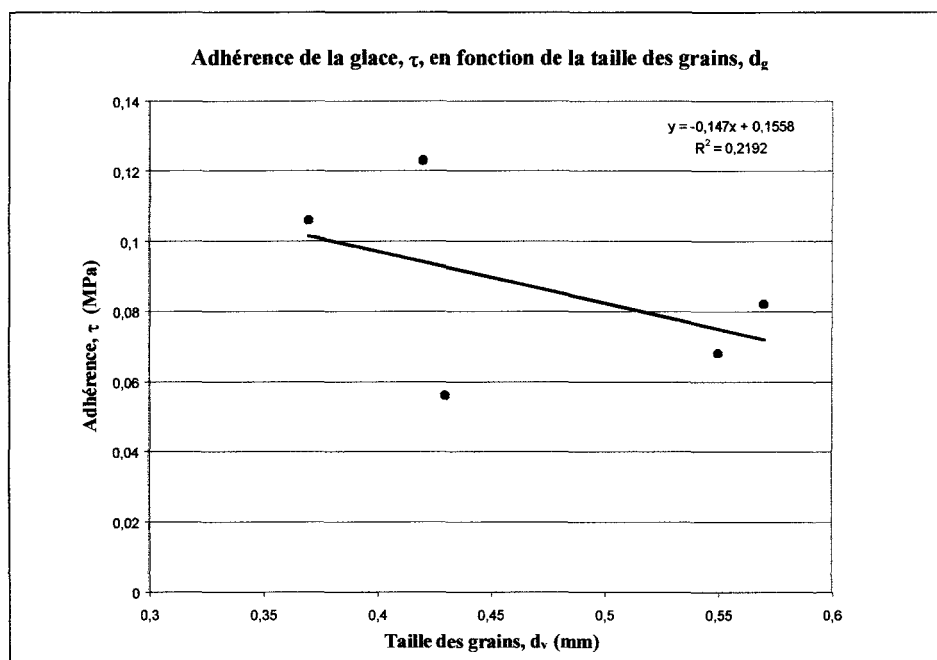


Figure 5.4 : Graphique de la taille des grains

Lors des mesures, il a été observé que la glace obtenue sur les surfaces lisses n'a pas la même taille de grain que la glace obtenue sur une surface rugueuse. La **Figure 5.5** montre les photographies des surfaces de la glace formées sur les revêtements W (lisse) et D (rugueuse). La surface lisse semble produire des grains plus gros sur la surface rugueuse. Le grand nombre d'aspérités de la surface rugueuse constitueraient un plus grand nombre de site favorable à la nucléation. Par contre, une analyse plus approfondie n'a pas permis de

déterminer une relation de proportionnalité significative. L'absence de relation directe peut être due à la dépendance d'autres facteurs comme la taille des gouttes et les paramètres thermodynamiques contrôlant nucléation ou, simplement à un manque de données représentatives.

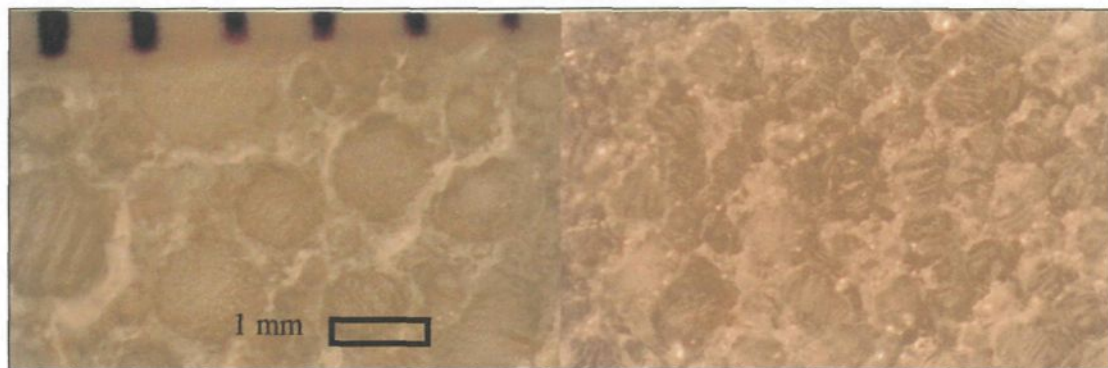


Figure 5.5 : Grains à la surface du produit W (à gauche) et D (à droite)

Lorsque la rupture de la glace n'est pas parfaitement adhésive, une légère influence de la taille des grains de la glace sur l'adhérence a été observée dans le graphique présenté à la **Figure 5.4**. Par contre, l'influence des principaux paramètres du revêtement et/ou du glaçage sur la tailles des grains n'a pas été démontrée. Des études supplémentaires apparaissent nécessaires pour approfondir ce phénomène.

5.4 Le mécanisme d'adhérence de la glace proposé

Parmi les quatre modèles décrits à la section 1.2.6, le modèle qui explique le mieux la dépendance de l'adhérence à certains facteurs est le mécanisme d'adhérence de la glace mécanique incluant le mécanisme de rupture de la couche limite faible (*WBL*). Par contre, le modèle chimique ne peut pas être ignoré.

À première vue, la glace semble adhérer aux substances par des forces mécaniques créées par des points d'ancrages. Lorsque les précipitations sont encore liquides, l'eau s'introduit dans les pores macroscopiques et microscopiques des surfaces. Lors de la congélation, l'eau se dilate et reste emprisonnée dans ceux-ci. Donc, plus la surface possède des pores ou un profil rugueux, plus la glace possède des possibilités d'ancrages et plus l'adhérence augmente. Ceci explique la dépendance significative de l'adhérence à la rugosité (**Figure 5.2**) mesurée lors de l'étude.

Lorsque l'interface glace/surface subit un cisaillement, la rupture produite peut être de différentes formes. Premièrement, lorsque le revêtement est plus rigide que la glace, la glace ne réussit pas briser ses enclaves et va elle-même se briser en absorbant l'énergie. La glace peut se briser en deux ou plusieurs gros morceaux. On nomme cette rupture cohésive. L'autre cas est lorsque la glace se brise à l'intérieur de la couche de glace à l'interface. Lorsque la glace se brise à l'interface, la rupture se situe dans la partie la plus vulnérable de la glace. Car, très proche de l'interface, la glace possède plus de défauts (impuretés,

porosités). Cette zone est la couche limite faible (*Weak Boundarie layer, WBL*). La rupture à l'intérieur de cette couche limite explique pourquoi, dans certains cas, l'adhérence est influencée par la taille des grains à l'interface. Lorsque ce type de rupture survient, l'énergie en cause est l'énergie cohésive de la couche limite qui dépend des propriétés de celle-ci qui peuvent varier d'un échantillon à l'autre.

Deuxièmement, lorsque la glace est plus rigide que le revêtement, la glace va briser la surface du revêtement lorsqu'elle va se décoller. Comme c'est le cas des produits S et P, une poudre et une substance déformable, pratiquement aucune glace ne va rester collée à l'interface mais après quelques déglacages, le produit va s'être détérioré. L'énergie créée par le cisaillement sera donc absorbée par le revêtement. Les revêtements moins rigides qui demandent moins d'énergie lorsqu'ils subissent des changements physiques, seront de meilleurs candidats pour réduire l'adhérence. Pour cette raison, en général les polymères sont supérieurs à réduire l'adhérence que les métaux. Plus le revêtement perd de la consistance, plus l'adhérence de la glace sera faible. Donc, les revêtements les plus efficaces à réduire l'adhérence sont les moins résistants. Les propriétés mécaniques de la glace et du revêtement sont donc très importantes. Elles vont déterminer à quel endroit la rupture va s'effectuer (dans la glace ou dans le revêtement) et par conséquent, l'énergie de cohésion nécessaire.

Donc, pour un revêtement très rigide, l'énergie pour rompre l'adhérence de la glace devient celle nécessaire pour briser une fine couche de glace très proche de l'interface glace/revêtement, la *BLW*. Un calcul très simple peut être effectué pour estimer la quantité d'énergie en jeu. Pour simplifier, posons tout d'abord quelques hypothèses.

Hypothèses :

- La rupture est une rupture du type fragile sans déformation plastique (la loi de Hooke est applicable)
- La glace subit seulement une contrainte de cisaillement, τ

Selon Michel (Michel, B., 1978), l'énergie élastique est décrit par l'équation 5.1 :

$$\text{Équation 5.1 : } W_{\tau} = \frac{V_{gl} \tau^2}{2G_{gl}} = \frac{W_r}{A_{gl}} = \frac{e_{gl} \tau^2}{2G_{gl}}$$

Où :

W_{τ} = Énergie élastique

V_{gl} = Volume de glace

A_{gl} = Aire de la glace

e_{gl} = Épaisseur de la glace

τ = Cisaillement

$G_{gl} = 3,029 \times 10^9$ Pa, module de Coulomb de la glace (calculé à partir du module du module d'Young et du coefficient de Poisson pour une glace de 0,87 de densité)

Alors, si on suppose que la *BLW* possède une épaisseur égale au diamètre moyen des gouttes de brume, l'épaisseur de la couche de glace à considérer est de 200 μm . Et, en utilisant la moyenne des valeurs d'adhérence mesurées sur les revêtements rigides, τ , (A, H, W, D, L) de 0,089 MPa, on obtient une énergie correspondant à 0,26 mJ/m^2 . Donc, cette énergie serait nécessaire pour produire une rupture de la couche très près de l'interface et par le fait même, ferait décoller la glace de l'échantillon. Dans la section 4.3.10, l'énergie provoquer par la flexion de nos échantillons et nécessaire à la rupture de la glace a été calculée pour chaque revêtement. Dans ce cas, la moyenne des énergies d'adhérence pour ces mêmes revêtements est de 0,10 mJ/m^2 . Si on compare ces deux valeurs, on observe qu'elles sont du même ordre de grandeur. Il est donc fort probable que le décollement de la glace s'effectue en majorité par une rupture cohésive de la glace à l'interface lorsque celle-ci est plus rigide que le revêtement.

Le fait que les ruptures observées sont majoritairement cohésives ne permet pas d'ignorer le modèle d'adhérence chimique. En effet, selon Lliboutry (Lliboutry, L., 1965), cette énergie attribuable aux liens intermoléculaires est beaucoup plus élevée que celle de la cohésion de la glace. Il évalue que l'énergie chimique serait environ 1500 fois plus forte. Il est donc logique, d'obtenir un bris cohésif au lieu d'un bris parfaitement adhésif lorsqu'une interface glace/revêtement est soumis à une contrainte. L'auteur Minsk (Minsk, L. D., 1982) observe, lors d'une étude d'adhérence sur différents revêtements, que dans plusieurs cas, la rupture d'adhérence de la glace ne s'effectuait pas à la surface du revêtement. Donc,

si les ruptures sont majoritairement cohésives, il est normal de ne pas observer d'influence de la tension de surface sur l'adhérence. L'adhérence chimique est peut-être présente mais ne peut être observée directement par de simples tests d'adhérence. Par contre, on observe que pour des revêtements hautement hydrophobes ($\theta_e > 110^\circ$), la rupture demeure majoritairement cohésive. Alors, même lorsque le revêtement n'a pratiquement aucune affinité chimique avec l'eau, les liens adhésifs sont très difficiles à briser. Cette observation nous laisse supposer qu'il serait difficile de créer une substance glaciophobe très efficace en jouant seulement sur ses propriétés chimiques sans tenir compte des propriétés mécaniques du revêtement.

De plus, il est important de souligner que la valeur d'énergie d'adhérence estimée est très faible. Cette valeur est d'au moins 100 000 fois plus faible que l'énergie requise pour un déglacage thermique et 10 000 fois plus faible qu'un déglacage mécanique par chocs en tension ou en compression (Laforte, J-L. et al., 1994). Ces résultats nous démontrent que le mode de déformation par flexion est très avantageux du point de vue énergétique. En effet, par la flexion, l'énergie utilisée est très localisée et permet de déglacer une surface sans la présence de frottement

CHAPITRE 6

CONCLUSION

6 CONCLUSION

À l'intérieur des limites imposées par les conditions d'essais et de mesures de ce projet de maîtrise, il est possible de tirer les conclusions suivantes applicables aux sept revêtements glaciophobes étudiés.

La masse de glace accumulée

La masse de glace accumulée sur les revêtements inclinés de 45° et 80° est la même que celle sur l'aluminium non recouverts. Donc, la présence d'un revêtement glaciophobe dans des conditions simulant des précipitations de bruine verglaçante (de 6 mm/hrs) ne modifie pas la quantité de glace qui s'accumule aux surfaces.

La performance des revêtements

Dans les sept revêtements étudiés, le revêtement le plus performant diminue l'adhérence de 37% comparativement à l'aluminium. Ce produit, qui est identifié par la lettre S, est vendu pour protéger les antennes de la glace. Il consiste en une poudre blanche compacte reposant sur une couche d'apprêt qui, malheureusement, se détériore au cours de l'utilisation. Les deuxième et troisième produits réduisant l'adhérence sont respectivement ceux correspondant aux lettres H et P, avec des réductions d'adhérence de 32% et 18%. Étonnement, le quatrième rang va au produit hydrophile A, qui diminue légèrement l'adhérence de 7%. Pour le reste des revêtements, soit W, L et D, l'adhérence de la glace n'est pas diminuée et dans certains cas augmentée. Donc, aucun produit ne présente une

diminution marquée de l'adhérence pouvant justifier une utilisation à grande échelle. De plus, d'après la variation de leurs propriétés durant les cycles de glaçages/déglaçages, les produits les plus résistants sont les moins performants à réduire l'adhérence. En terme d'énergie, il a été mesuré qu'il faut en moyenne $0,10 \text{ mJ/m}^2$ pour déglacer par cisaillement une surface d'aluminium ou recouverte d'un des revêtements étudiés.

Vieillissement accéléré

Dans le cas des revêtements réduisant l'adhérence, la détérioration causée par les déglaçages successifs est beaucoup plus importante que celle causée par le rayonnement UV. De plus, il a été observé, lors des tests de vieillissement, que les solides comme le W, L et D ont fariné. Le farinage produit une perte de consistance à la surface du revêtement et amène une diminution d'adhérence.

Facteurs influençant l'adhérence

D'après les résultats obtenus dans les conditions expérimentales décrites au chapitre 2, le facteur affectant le plus l'adhérence de la glace sur les revêtements étudiés est la rugosité. L'adhérence de la glace à des surfaces solides augmente proportionnellement avec la rugosité. De $0,08 \text{ }\mu\text{m}$ à $5,3 \text{ }\mu\text{m}$ de R_a , l'adhérence augmente d'environ $0,014 \text{ MPa}/\mu\text{m}$. En extrapolant la tendance vers une rugosité nulle, on obtient une valeur d'adhérence d'environ $0,064 \text{ MPa}$. Donc, même à de faibles rugosités, la glace adhère aux surfaces solides. Aucune relation de proportionnalité n'a été déterminée avec l'angle de contact et

l'énergie de surface des revêtements. Par contre, une légère diminution de l'adhérence est observée lorsque la taille des grains de glace à l'interface augmente.

Mécanisme d'adhérence

Le modèle qui explique le mieux la forte dépendance de l'adhérence à la rugosité et la faible dépendance de l'adhérence à la taille des grains est celui du mécanisme d'adhérence mécanique. Par contre, le fait que le mécanisme de rupture observé lors des mesures d'adhérence soit celui de la couche limite faible (*WBL*) ne permet pas d'ignorer le modèle chimique. Car, le modèle chimique décrit l'adhérence de la glace à la surface par des liens chimiques faibles qui devraient être briser lors du décollement de la glace. Donc, pour observer l'énergie d'adhérence chimique en jeu ainsi que les facteurs l'affectant, il est nécessaire d'obtenir un bris d'adhérence situé à l'interface glace/revêtement. Les ruptures semi-cohésives observées lors des essais, rendent possible le fait qu'il existe des liens chimiques à l'interface mais qu'ils seraient plus difficile a briser que la couche limite faible. En effet, l'énergie requise pour décoller la glace lors de nos mesures d'adhérence est en réalité l'énergie de cohésion de la couche limite faible (dans la glace ou dans le revêtement).

À la lumière de toutes ces observations, on peut conclure que parmi les substances étudiées dans cette étude, aucune ne possède les qualités d'une substance glaciophobe. La glace s'y accumule et y adhère avec une force semblable à celles observées l'aluminium. De plus, les substances étudiées possèdent une efficacité éphémère. On note que les propriétés

mécaniques et physiques des revêtements sont plus importantes que les propriétés chimiques pour influencer l'énergie nécessaire au décollement de la glace lors des tests d'adhérences. Également, quelques recommandations peuvent être tirées de ces observations. Premièrement, lors d'une prochaine étude à ce sujet, il serait préférable d'utiliser deux techniques différentes pour mesurer l'adhérence. Ceci permettrait d'augmenter la précision des valeurs d'adhérence mesurées en tenant compte d'un plus grand nombre de facteurs. Deuxièmement, la mesure de plusieurs propriétés mécaniques, comme la dureté et la rigidité des revêtements, pourrait permettre une meilleure compréhension du phénomène d'adhérence de la glace.

Bibliographie

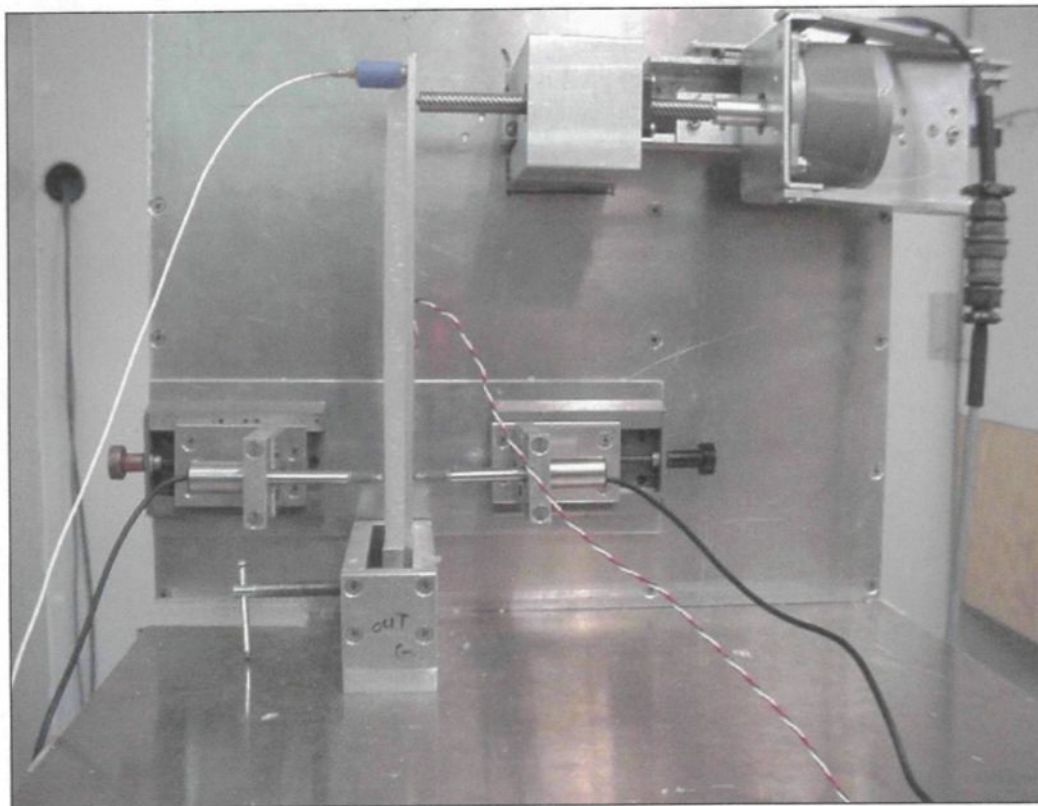
- ANDERSON, D. N., REICH, A. D., (1997). *"Test of the Performance of Coatings for low Ice Adhesion"*. NASA Lewis Center, Cleveland Ohio and BF Goodrich R & D Center, Brecksville Ohio, Report, Janvier 1997, 12 p.
- ANDERSSON, L. O., GOLANDER, G. C., PERSSON, S., (1994). *"Ice Adhesion to Rubber Materials "*. Journal of Adhesion science and technology, vol. 8, no. 2, 1994, pp. 117-132.
- ANDREWS, E. H., MAJID, H. A., LOCKINGTON, N. A., (1984). *"Adhesion of Ice to a Flexible Substrate"*. Journal of Materials Science, vol. 19, 1984, pp. 73-81.
- ARTIS, D. R., (1975). *"Icephobic Coating for Army Rotary Wing Aircraft "*.U.S. Army Air Mobility R & D Laboratory, Fort Eustis, Report USSAAMRDL-TN-19, Mai 1975, 20 p.
- ASTM, (1996). *"Standard Practice for Operating Light- and Water- Exposure Apparatus (Fluorescent UV-Condensation Type) for Exposure of Nonmetallic Materials "*. Designation: G 53-96, 1996, 9 p.
- BLACKBURN, C., (2000). *"Appareil mesurant l'adhérence de la glace"*. Laboratoire international des matériaux anti-givre, Rapport de projet, hiver 2000, pp. 53.
- BLACKBURN, C., LAFORTE, C., LAFORTE, J.-L., (2000). *"Apparatus for measuring the Adhesion force of thin Ice Sheet on a substrate "*. International Workshop of Atmospheric Ice on Structures, Chester, June 2000, 5p.

- BAUM, B., THOMA, L., HOLLEY, W. H., (1996). *"Development of Conductor Deicing Systems "*. Springborn Laboratories, Enfield, Connecticut, Electric Power Research Institut, Palo Alto, California, Final Report, EPRI TR-107000 2367-01, October 1996.
- CROUTCH, V. K., HARTLEY, R. A., (1992). *"Adhesion of Ice to Coating and the performance of Ice Release Coating "*. Journal of Coatings Technologies, vol. 64, no. 815, 1997, pp. 41-52.
- FREIBERGER, A., LACKS, H.,(1961). *"Ice Phobic Coating for Deicing Naval Vessels "*. Proceeding of 5th Navy Science Symposium, pp. 234-237.
- JELLINEK, H. H. G., (1959). *"Adhesive Properties of Ice "*. Journal of Colloid Science, vol. 14, 1959, pp. 268-280.
- JELLINEK, H. H. G., (1962). *"Ice Adhesion "*. Canadian Journal of Physics, vol. 40, 1962, pp. 1294-1309.
- KUROIWA, D., (1965). *" Icing and Snow Accretions on Electric Wires "*. CRREL Research Report 123.
- LAFORTE, J-L., ALLAIRE, M-A., ASSELIN, D., (1994). *"État de l'art du déglacage des conducteurs et des câbles aériens "*. Groupe de Recherche en Ingénierie de l'environnement atmosphérique, Université du Québec à Chicoutimi, Hydro-Québec, Rapport HQ-94-01, décembre 1994, 207 p.
- LAFORTE, J-L., (2000). *"Note de cours: sujets spéciaux "*. Université du Québec à Chicoutimi, printemps 2000, 332 p.

- LANET, V., GANDINI, A., *"Characterization of Surface Energie of Waterless Plates "*.
École Française de Papeterie et Industrie Graphique, 6 p.
- LANDROCK, A. H., (1985). *"Adhesives technology handbook "*. Noyes Publications, New-Jersey, 1985, 444 p.
- LANDY, M., FREIBERGER, A., (1967). *"Study of Ice Adhesion "*. Journal of Colloid Interface Science, vol. 25, 1967, pp. 231-244
- LLIBOUTRY, L., (1964). *"Traité de Glaciologie "*. Tome I, Masson & Cie, Paris, 1964, pp. 228-229.
- MICHEL, B., (1978). *"Ice Mechanics "*. Les Presses de l'Université Laval, Québec, 1978, 484 p.
- MINSK, L. D., (1982). *"How are Ice phobic caotings "*. Atmospheric Icing on Structure, Proceeding of the First, vol. 1, no. 1, 1982, pp. 93-95.
- NEUMAN, A. W., SPELT, J. K., (1996). *"Applied Surface Thermodynamics "*. University of Toronto, Ontario, Marcel Dekker Inc., 1996, 646 p.
- PEPIN, X., BLANCHON, S., COUARRAZE, G., (1998). *"Powder Dynamic Contact Angle Measurements: Young Contact Angles and Effectively wet Perimeters "*, Powder Technology, vol. 99, mail982, pp. 264-271.
- PETRENKO, V. F., RYZHKIN, I. A., (1997). *"Physical Mechanisms Responsible for Ice Adhesion "*. Physical Chemistry B, vol. 101, no. 32, 1997, pp. 6267-6270.

- PORTE, H. A., NAPPIER, T. E., (1963). *"Coating Material For Prevention of Ice and Snow Accumulation, Literature Survey "*. U.S. Naval Eng. Lab., Report, TN-541-A, novembre 1963, 5 p.
- SAITO, H., TAKAI, K., YAMAUCHI, G., (1997). *"Water- and Ice-repellent Coatings "*. Surface Coatings International, vol. 80, no. 4, 1997, pp. 168-171.
- SCAVUZZO, R. J., CHU, M. L., (1994). *"Ice Fracture Toughness from Peel Tests"*. Atmospheric Icing on Structure , Proceeding of the sixth, Montréal, 1994, pp. 305-314.
- STALLABRASS, J. R., PRICE, R. D., (1962). *"On the Adhesion of the Ice to Various Materials "*. National Research Laboratories, Division of Mechanical Engineering, Low Temperature Laboratory, Report, LR-350, juillet 1962, 11 p.
- UBM, *"Operator Manual "*. UBSoft Version 1.9, UBM Corporation, Sunnyvale, California.
- WESSTMARK, C., WILSON, P., GASSNER, J., (1997). *"Chemical Free Deicing- A System Approach "*. U.S. Department of Transport, Final Report, DTS-00007-FM-97050-1065, juillet 1997, 41 p.
- YOSHIDA, M., OHICHI, T., KONNO, K., GOCHO, M., (1991). *"Adhesion of Ice to Various Materials "*. Cold Regions Technology Conference, Sapporo, Japon, octobre 1991, 6 p.

ANNEXE 1 : Photographie de l'appareil mesurant l'adhérence de la glace



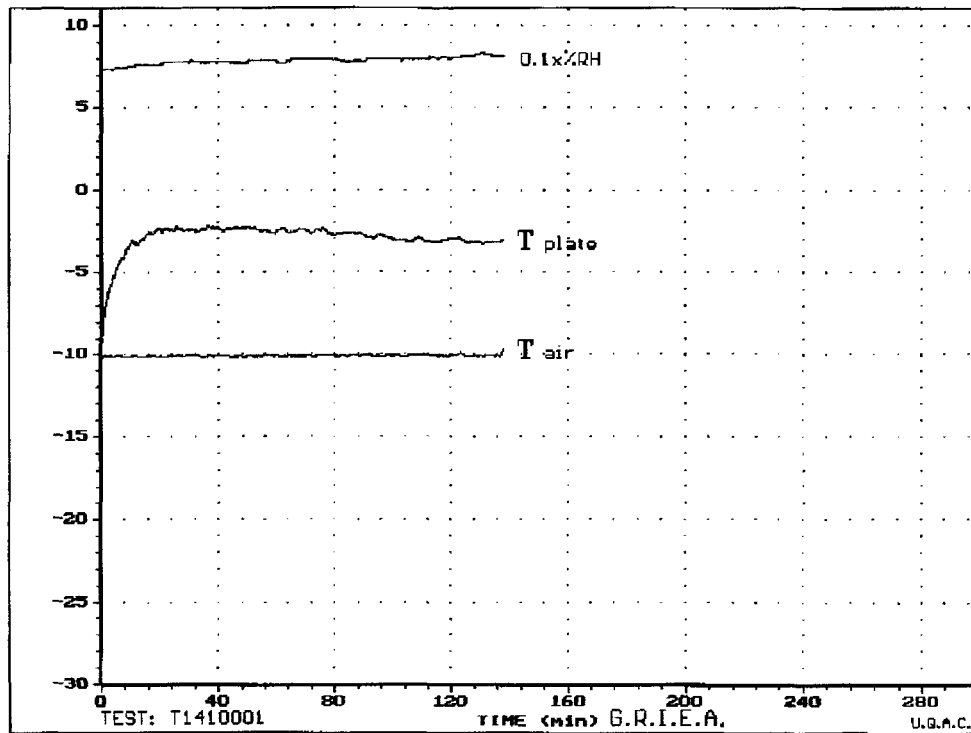
Appareil mesurant l'adhérence de la glace

ANNEXE 2 : Courbe de la température de l'échantillon durant le glaçage

RELATIVE HUMIDITY, AIR AND PLATE TEMPERATURES

TEST: T1410001

DATE: 100/10/14



Test length= 138 min

Averages p f
=====

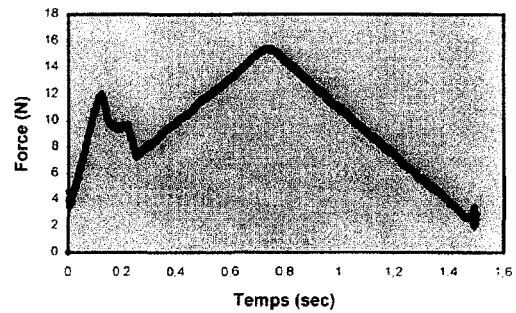
T air	=	-10.1	p	0.04
T plate	=	-2.9	p	0.8
%RH	=	78.7	p	1.9

ANNEXE 3 : Fiche de résultats d'adhérence

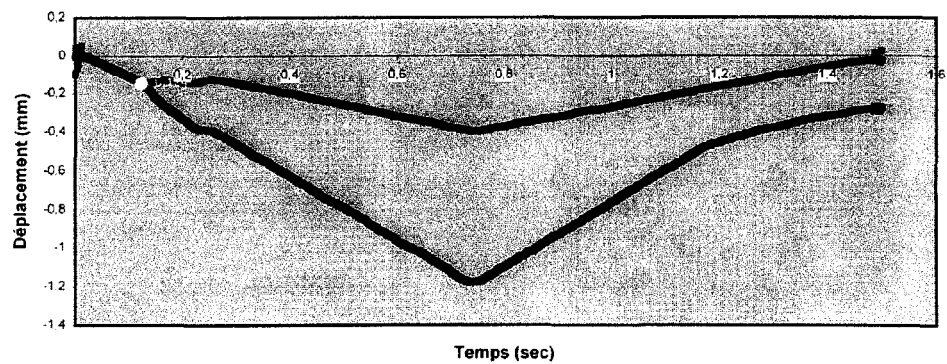
Déglacage Tableau des résultats

Nom Fichier:	h2109009
Date:	21/09/00
Numéro d'échantillon:	41
Nombre de glaçages:	2
Densité de la glace:	0,88 Kg/m ³
Hauteur de la Glace:	0,013 m
Type de revêtement:	h
Hauteur du revêtement:	0,00002 m
Temps de décollement:	0,124 sec
Effort Tranchant:	11,99544 N
Cisaillement:	0,048527 MPa

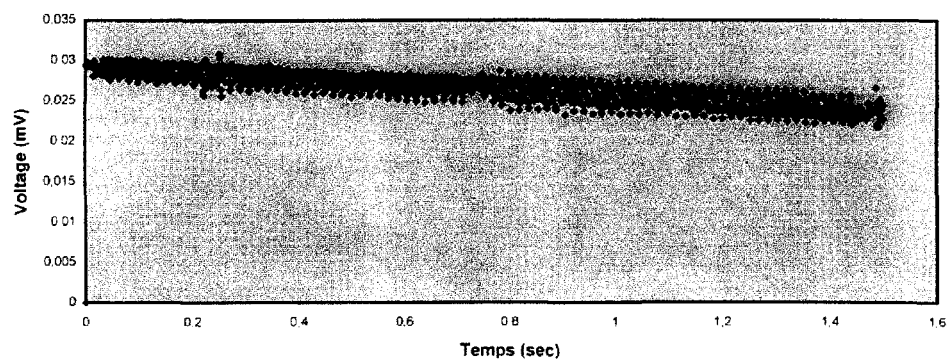
Courbe de la Cellule de Charge, h2109009



Courbes des LVDT, h2109009



Courbe de l'accéléromètre, h2109009



ANNEXE 4 : Calcul de l'énergie d'adhérence

L'énergie d'adhérence :

- Pour une poutre de type composite glace/aluminium. Les revêtements étant des couches très minces (l'ordre du micron) sous forme de peinture, leur épaisseur a été posée égale à zéro.
- Lorsque l'axe à neutre se situe à l'interface (aucune contrainte normale de traction ou compression)

Lorsque la poutre est constituée du même matériau la déformation angulaire est continue et la séparation se produit par cisaillement à l'axe neutre. Mais pour une poutre composite, les deux matériaux ne possèdent pas les mêmes modules élastiques et coefficients de Poisson alors, la déformation angulaire n'est pas continue. Aux surfaces supérieures et inférieures de la poutre, la déformation angulaire est nulle. À l'axe neutre, cette déformation est maximal pour les deux matériaux. Donc, cette différence dans la déformation angulaire engendre une différence d'énergie de l'effort tranchant, U_v , dans la partie supérieure et inférieure de la poutre. Cette différence exprimée par l'**Équation A4.1** correspond à l'énergie nécessaire pour briser le lien d'adhérence.

$$\text{Équation A4.1 : } \Delta U = \frac{1}{2 \cdot G} \cdot \int_V \tau_{xy}^2 \cdot dV = (U_v)_{gl} - (U_v)_{al}$$

Où les énergies d'effort tranchant de l'aluminium, $(U_v)_{al}$, et de la glace, $(U_v)_{gl}$, correspondent à :

$$\text{Équation A4.2 : } (U_v)_{al} = \frac{12 \cdot P_2 \cdot h_{al} \cdot L \cdot (1 + \nu_{al})}{5 \cdot b \cdot E_{al} \cdot (h_{gl} + h_{al})}$$

$$\text{Équation A4.3 : } (U_v)_{gl} = \frac{12 \cdot P_2 \cdot h_{gl} \cdot L \cdot (1 + \nu_{gl})}{5 \cdot b \cdot E_{gl} \cdot (h_{gl} + h_{al})}$$

Donc, l'énergie d'adhérence est exprimée par l'Équation A4.4

$$\text{Équation A4.4 : } \Delta U = \frac{12}{5} \cdot \frac{1}{(1 + R_E)^2} \cdot \left[R_E^3 \frac{1 + \nu_{gl}}{1 + \nu_{al}} - 1 \right] \cdot \frac{1 + \nu_{al}}{E_{al}} \cdot \frac{L}{b \cdot h} \cdot P_2$$

où

U : énergie (J)

G : Module de Coulomb de la poutre

τ_{xy} : Contrainte de cisaillement (Pa)

$$R_E : \sqrt{\frac{E_{al}}{E_{gl}}} = 2,94$$

ν_{gl} : Coefficient de Poisson de la glace = 0,32

ν_{al} : Coefficient de Poisson de l'aluminium = 0,34

L : Longueur de glace = 0,255 m

b : Largeur de la glace = 0,02541 m

h : Hauteur de glace = 0,013 m

P : Effort tranchant lors du décollement de la glace, directement mesuré par une cellule de charge (N)