

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
AU DOCTORAT EN INGÉNIERIE

PAR

CAROLINE LAFORTE, M. Sc.

**DÉFORMATION À LA RUPTURE ADHÉSIVE PAR TRACTION, FLEXION ET
TORSION D'UN SUBSTRAT GIVRÉ**

Juin 2008



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

En 2007, il est encore justifié de travailler à développer des méthodes de déglaçage. Car bien que plusieurs méthodes thermiques ou mécaniques aient prouvé leur efficacité sur le terrain, l'industrie réclame encore des façons de dégivrer moins énergivores. Dans cette optique, un projet de recherche a été amorcé en 1999. Ce projet visait à développer un système déglaçant utilisant un nouveau type de matériau capable de se déformer sous une faible excitation électrique et de produire suffisamment d'énergie mécanique pour provoquer une rupture de la glace en surface. L'ajout d'un réducteur d'adhérence comme un glaciophobe améliorant l'efficacité d'une telle méthode a été étudié dans le cadre d'une maîtrise. Une étude préliminaire et une revue littéraire sur les matériaux électroactifs ont permis de conclure que la technologie de ces matériaux pouvait avoir le potentiel nécessaire au déglaçage mais n'était pas encore assez développée pour être applicable maintenant. C'est donc dans ce contexte qu'a été défini le sujet de la présente thèse dédiée à l'étude du comportement mécanique d'un substrat glacé soumis à des déformations afin de simuler l'effet d'un matériau électroactif. Cette simulation en laboratoire permettra de déterminer les déformations de rupture du substrat provoquant le déglaçage, en fonction du type et de la vitesse de déformation, de l'épaisseur de glace et de la nature du substrat.

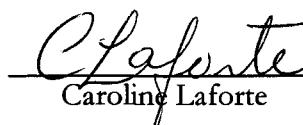
Pour ce faire, les déformations de substrats d'aluminium et de nylons givrés ont été mesurées à l'aide de jauge de déformation et analysées au moment de la rupture de la couche de glace. Trois montages ont été développés ou adaptés spécifiquement pour les besoins de la thèse afin de soumettre un échantillon glacé à trois modes différents de sollicitation, soit à la torsion, la traction et la flexion sans effort imposé directement sur la glace. Pour chaque type de

déformation, 3 épaisseurs de glace ont été étudiées soit 2, 5 et 10 mm à trois différentes vitesses d'application des charges. L'essai consiste à givrer un substrat sur lequel une jauge de déformation est collée et à le déformer en enregistrant la déformation en temps réel. La perte de rigidité causée par la rupture de la couche de glace ou son décollement provoque un changement soudain dans la pente de la courbe contrainte-déformation permettant de déterminer précisément la déformation à la rupture ainsi que les contraintes dans la glace à l'interface y étant associées.

Il a été montré que les déformations de rupture ont été mesurées de façon précise et juste avec des coefficients de variation inférieurs à 10 %. Le pourcentage de déformation ϵ % d'un substrat d'aluminium 2024 T3 nécessaire au bris de 2 à 10 mm de glace est en moyenne de $0,043 \pm 0,023$ % en torsion, $0,037 \pm 0,015$ % en traction et de $0,004 \pm 0,003$ % en flexion. Pour un substrat de nylon, dans les mêmes conditions, la pourcentage de déformation moyen est de $0,020 \pm 0,013$ % en torsion, $0,059 \pm 0,011$ % en traction et $0,033 \pm 0,008$ % en flexion. Les déformations de rupture diminuent lorsque l'épaisseur de glace augmente et sont indépendantes de la vitesse de déformation indiquant la rupture fragile du film de glace.

L'analyse des résultats a été complétée par l'évaluation mathématique des contraintes de rupture déterminées au moment du bris et dans la glace à l'interface à partir des déformations et forces mesurées. Malgré que les contraintes de rupture évaluées en traction se soient avérées élevées avec $4 \text{ MPa} \pm 50$ % sur l'aluminium comparativement celles en torsion ($1,26 \text{ MPa} \pm 67$ %) et flexion ($0,014 \text{ MPa} \pm 36$ %) se sont avérées valides. Les contraintes de rupture diminuent avec l'épaisseur de glace, sont indépendantes de la vitesse de déformation et très peu

influencées par la nature du substrat. Il a également été montré que les contraintes de rupture les plus faibles ont été obtenues en flexion où le cisaillement à l'interface est légèrement combiné à une contrainte normale. En général, il est plus facile de dégeler une surface via la déformation du substrat lorsque : la déformation imposée est en flexion; le taux de déformation est supérieur à $8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$; la couche de glace a une épaisseur d'environ 10 mm et le substrat est lisse. De plus, un câble toronné soumis à une torsion déglace plus efficacement qu'un câble à surface lisse.



Caroline Laforte

Étudiante



Jean-Louis Laforte

Directeur de recherche



Daniel Marceau

Co-Directeur de recherche

Remerciements

Premièrement, je tiens sincèrement à remercier Monsieur Jean-Louis Laforte et Monsieur Daniel Marceau pour avoir dirigé et codirigé ces travaux de recherche. Je remercie également le directeur du Laboratoire International des matériaux antigivre, LIMA, Monsieur Jean Perron ainsi que tout le personnel du LIMA pour leur coopération essentielle au déroulement des travaux.

De plus, je tiens à remercier Yannick Gagnon et Julien Tremblay, techniciens à L'UQAC qui ont bien voulu m'aider lors de mes essais mécaniques. Merci également à Monsieur Laszlo Kiss qui a collaboré à l'élaboration initiale du projet.

Finalement, je remercie mon mari, Carol-Maxime Truchon qui a su m'encourager tout au long de cette longue aventure.

Tables des matières

| | |
|---------------------------|------|
| Résumé | ii |
| Remerciements | v |
| Tables des matières | vi |
| Liste des symboles..... | x |
| Liste des figures..... | xiii |
| Liste des tableaux | xvii |

| | |
|---|-----------|
| 1. Introduction | 20 |
| 1.1 Introduction..... | 20 |
| 1.2 Problématique spécifique..... | 25 |
| 1.3 Objectifs | 26 |
| 1.3.1 Objectif principal..... | 26 |
| 1.3.2 Objectifs secondaires | 26 |
| 1.4 Méthodologie..... | 26 |
| 1.5 Originalités de la thèse | 27 |
| 1.6 Plan de travail | 28 |
| 2. Le comportement mécanique de la glace polycristalline et mesures d'adhérence.31 | 31 |
| 2.1 La glace polycristalline..... | 31 |
| 2.1.1 Nomenclature | 31 |
| 2.1.2 Transition ductile-fragile de la glace polycristalline | 32 |
| 2.1.3 Mécanisme de déformation fragile..... | 33 |
| 2.1.4 Mécanisme de déformation ductile..... | 34 |
| 2.1.5 Modules de Young et de Coulomb de la glace polycristalline | 34 |
| 2.2 Résistance de la glace polycristalline | 35 |
| 2.2.1 Résistance en tension et compression | 35 |
| 2.2.2 Résistance en cisaillement | 37 |
| 2.3 La glace polycristalline sous forme de glace accrétée sur une surface..... | 40 |
| 2.3.1 Structure de la couche de glace polycristalline accrétée | 40 |
| 2.3.2 Mécanismes d'adhérence | 42 |
| 2.3.3 La mesure de l'adhérence de la glace..... | 43 |
| 2.3.4 Variabilité dans les valeurs d'adhérence de la glace..... | 44 |
| 2.4 Technique de mesure d'adhérence par déformation du substrat..... | 47 |
| 2.4.1 Mesure d'adhérence de la glace | 47 |
| 2.4.2 Mesure d'adhérence de revêtements de surface..... | 47 |
| 3. Les méthodes de déglaçage et les matériaux électroactifs..... | 50 |
| 3.1 Introduction..... | 50 |
| 3.2 Les méthodes de déglaçage..... | 50 |
| 3.2.1 Les méthodes actives | 53 |
| 3.2.2 Les méthodes passives | 54 |
| 3.3 Les principaux systèmes/matériaux actifs..... | 55 |
| 3.3.1 Pneumatique : Système McKibben | 56 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 3.3.2 | Systèmes ioniques..... | 57 |
| 3.3.3 | Systèmes électriques..... | 66 |
| 3.3.4 | Alliages à mémoire de forme AMF..... | 69 |
| 3.3.5 | Performance des systèmes/matériaux actifs..... | 70 |
| 3.4 | Les electroactifs appliqués au déglaçage : leur potentiel et leurs limites..... | 72 |
| 3.4.1 | Pneumatique..... | 72 |
| 3.4.2 | Piezoelectrique | 72 |
| 3.4.3 | AMF | 74 |
| 4. | Montages et mesures expérimentales..... | 76 |
| 4.1 | Introduction..... | 76 |
| 4.2 | Mesure de l'adhérence de la glace..... | 76 |
| 4.3 | Essais de déglaçage par déformation du substrat en traction..... | 79 |
| 4.3.1 | Montage et échantillons..... | 79 |
| 4.3.2 | Calculs et modèles utilisés | 82 |
| 4.4 | Détermination des critères de déglaçage par torsion..... | 85 |
| 4.4.1 | Montage et échantillons..... | 85 |
| 4.4.2 | Calculs et modèles utilisés | 91 |
| 4.5 | Détermination des critères de déglaçage par flexion | 95 |
| 4.5.1 | Montage et échantillons..... | 95 |
| 4.5.2 | Calculs et modèles utilisés | 99 |
| 4.6 | Mesures de la rugosité des substrats et de la densité de la glace | 102 |
| 4.6.1 | Mesure de la rugosité des substrats..... | 102 |
| 4.6.2 | Mesure de la densité de glace..... | 102 |
| 4.7 | Essais de déglaçage avec 3 matériaux actifs | 103 |
| 4.7.1 | Muscle McKibben | 103 |
| 4.7.2 | Polymère electroactif (CPMI) | 106 |
| 4.7.3 | Composite piezoelectrique (MFC) | 108 |
| 5. | Validation des montages..... | 112 |
| 5.1 | Introduction..... | 112 |
| 5.2 | Précision et exactitude..... | 112 |
| 5.3 | Détermination des erreurs de mesure | 112 |
| 5.4 | Montage de traction..... | 113 |
| 5.4.1 | Uniformité de la déformation mesurée | 113 |
| 5.4.2 | La répétitivité des mesures de charge et de déformation | 114 |
| 5.4.3 | La justesse des mesures | 116 |
| 5.5 | Le montage de torsion | 116 |
| 5.5.1 | Effet du trou sur la déformation mesurée | 116 |
| 5.5.2 | La répétitivité des mesures du couple et du cisaillement..... | 118 |
| 5.5.3 | La justesse des mesures | 119 |
| 5.6 | Le montage en flexion givré | 120 |
| 5.6.1 | La répétitivité des mesures de force et de déformation..... | 120 |
| 5.6.2 | Justesse des mesures | 121 |
| 5.6.3 | Qualité des montages..... | 123 |
| 6. | Résultats expérimentaux..... | 125 |
| 6.1 | Introduction..... | 125 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.2 | Caractéristiques de la glace étudiée..... | 126 |
| 6.2.1 | Contexte de formation..... | 126 |
| 6.2.2 | Densité | 128 |
| 6.2.3 | Taille des grains..... | 129 |
| 6.3 | Nature des substrats étudiés..... | 131 |
| 6.3.1 | Rugosité | 131 |
| 6.3.2 | L'adhérence de la glace aux substrats | 132 |
| 6.4 | Résultats des essais de déformation givrés | 134 |
| 6.4.1 | Méthode de détermination de la déformation de rupture | 134 |
| 6.5 | L'essai de traction givré | 137 |
| 6.5.1 | Composite Al 3105 H14/glace..... | 140 |
| 6.5.2 | Composite Al 2024 T3/glace..... | 140 |
| 6.5.3 | Composite Nylon/glace | 141 |
| 6.6 | L'essai de torsion givré | 142 |
| 6.6.1 | Composite aluminium/glace..... | 148 |
| 6.6.2 | Composite nylon/glace | 148 |
| 6.6.3 | Torsion d'un câble toronné glacé | 149 |
| 6.7 | L'essai de flexion givré | 151 |
| 6.7.1 | Composite Al 2024 T3/glace et Nylon/glace | 155 |
| 6.8 | Examen visuel..... | 155 |
| 6.8.1 | L'essai de traction givré | 155 |
| 6.8.2 | L'essai de torsion givré | 158 |
| 6.8.3 | L'essai de flexion givré | 161 |
| 6.9 | Caractérisation des systèmes: McKibben, CPMI et MFC..... | 163 |
| 6.9.1 | Le muscle pneumatique McKibben..... | 163 |
| 6.9.2 | CPMI..... | 165 |
| 6.9.3 | MFC..... | 169 |
| 7. | Discussion..... | 173 |
| 7.1 | Introduction..... | 173 |
| 7.2 | Rappel de l'objectif principal des montages expérimentaux..... | 173 |
| 7.3 | L'essai de traction givré..... | 174 |
| 7.3.1 | Vérification du calcul des contraintes à partir de la déformation..... | 174 |
| 7.3.2 | Validité de la contrainte de rupture | 176 |
| 7.3.3 | Causes d'erreurs | 177 |
| 7.3.4 | Effet de la flexion | 178 |
| 7.4 | L'essai de torsion givré | 181 |
| 7.4.1 | Validité des contraintes de rupture en cisaillement | 181 |
| 7.4.2 | Effet de l'épaisseur | 182 |
| 7.5 | L'essai de flexion givré | 185 |
| 7.5.1 | Validité des contraintes de rupture | 185 |
| 7.5.2 | Effet de l'épaisseur de glace | 186 |
| 7.6 | Comportement fragile de la glace accrétée..... | 190 |
| 7.7 | Effet du mode de déformation | 191 |
| 7.8 | Effet du substrat sur les déformations de rupture | 194 |
| 7.8.1 | Effet de la rigidité du substrat | 194 |

| | | |
|-------|---|------------|
| 7.8.2 | Effet de la rugosité du substrat | 194 |
| 7.9 | L'applicabilité des systèmes de matériau actifs au déglaçage..... | 194 |
| 7.9.1 | Déglaçage par déformation d'une plaque ou d'un câble..... | 195 |
| 8. | Conclusion et recommandations | 198 |
| 8.1 | Déformations de rupture | 198 |
| 8.2 | Contraintes de rupture | 199 |
| 8.3 | Conditions favorisant le déglaçage | 199 |
| 8.4 | Recommandations | 201 |
| 9. | Bibliographie..... | 203 |

ANNEXES

| | |
|--|-----|
| ANNEXE 1 : Matériels et protocoles..... | A1 |
| ANNEXE 2 : Exemple de fiche d'essai et sa description pour l'essai de traction givré | A10 |
| ANNEXE 3 : Exemple de fiche d'essai pour l'essai de torsion givré | A13 |
| ANNEXE 4 : Exemple de fiche d'essai pour l'essai de flexion givré | A17 |
| ANNEXE 5 : Exemple de calcul de la contrainte normale pour l'essai de traction givré | A21 |
| ANNEXE 6 : Exemple de calcul de la contrainte en cisaillement pour l'essai de torsion givré | A23 |
| ANNEXE 7 : Exemple de calcul des contraintes pour l'essai de flexion givré | A25 |
| ANNEXE 8 : Exemple de calcul des contraintes à partir de la force pour l'essai de traction | A28 |

Liste des symboles

| | | |
|--------------|---|--|
| A_g | Aire de la glace | m^2 |
| AMF | Alliage à mémoire de forme | |
| A_s | Aire du substrat | m^2 |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> | |
| b_g | Largeur du dépôt de glace | m |
| b_s | Largeur du substrat | m |
| C_i | Terme de cohésion | Pa |
| C | Coulomb | A.s |
| CPMI | Composite-métal à échange ionique | |
| CRREL | <i>Cold Regions Research and Engineering Laboratory</i> | |
| D | Diamètre | m |
| DVM | Diamètre volumique médian des gouttes d'eau | μm |
| ϵ | Déformation | |
| e_g | Épaisseur de glace | m |
| ϵ | Constant diélectrique | |
| ϵ_0 | Permittivité du vide | $8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$ |
| E | Module de Young | Pa |
| G | Module de Coulomb | Pa |
| γ | Cisaillement | |
| HDPE | <i>High Density PolyEthylene</i> | |

| | | |
|-----------------|--|----------|
| h_s | Hauteur du substrat | m |
| I | Moment d'inertie | m^4 |
| J | Moment de torsion | m^4 |
| LDPE | <i>Low Density Polyethylene</i> | |
| L_f | Chaleur Latente | J |
| LIMA | Laboratoire international des matériaux antigivre | |
| λ_{max} | Distance maximale entre deux fissures | m |
| LVDT | <i>Linear Voltage Differentiel Transformer</i> | |
| m | Masse | kg |
| M | Moment | N.m |
| MEI | Membrane d'échange ionique | |
| MFC | <i>Macro Fiber Composit</i> | |
| n | Rapport de rigidité | N |
| P | Force appliquée | N |
| P | Pression | Pa |
| P(VDF-trFe) | <i>poly(vinylidene fluoride-trifloproethylene)</i> | |
| PZT | <i>Piezoelectric Zirconate Titanate</i> | |
| Q | Moment polaire | m^3 |
| ρ | Masse volumique | g/cm^3 |
| r | Rayon | m |
| R_a | <i>Roughness average</i> | μm |
| R_e | Limite élastique | Pa |

| | | |
|----------|-------------------------------------|-----------|
| r^2 | Coefficient de corrélation linéaire | |
| σ | Contrainte normale | Pa |
| SWNT's | <i>Single -Wall Nanotubes</i> | |
| τ | Contrainte en cisaillement | Pa |
| θ | Température absolue | °C |
| T | Température ou Couple | °C ou N.m |
| UQAC | Université du Québec à Chicoutimi | |
| v | Vitesse de vent | m/s |
| V | Effort tranchant ou Voltage | N ou V |
| VB | <i>Visual Basic</i> | |
| y_c | Distance à l'axe neutre | m |
| ω | Vitesse de rotation | rad/s |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1-1 : Atterrissage manqué, Chicago 2005..... | 21 |
| Figure 1-2 : Lignes électriques givrées..... | 22 |
| Figure 2-1 : Résistance en tension et en compression du givre dur à -14°C en fonction du taux de déformation (Laforte et al., 1994) | 36 |
| Figure 2-2 : Contrainte de rupture en fonction du taux de déformation (J. Bilodeau, 1996) | 39 |
| Figure 2-3 : Micrographie d'une coupe perpendiculaire à la surface d'une couche de glace accrétée en soufflerie réfrigérée (grossissement : 15,5 x)..... | 41 |
| Figure 3-1 : Schéma d'un système McKibben (Klute et al.,1999)..... | 57 |
| Figure 3-2 : Activation d'un gel réticulé (S.G., Wax et R.R., Sands, 1999) | 59 |
| Figure 3-3: Structure moléculaire typique d'un polymère ionique | 60 |
| Figure 3-4: Microstructure d'un actionneur CPMI (S.G., Wax et R.R., Sands, 1999)..... | 61 |
| Figure 3-5: Mécanisme de déformation des membranes CPMI..... | 62 |
| Figure 3-6: Film actionneur triple couche (polypyrrole–polymère électrolyte solide/LiClO ₄ – polypyrrole)..... | 64 |
| Figure 3-7: Mouvement angulaire de la membrane triple-couche pendant l'application d'un courant électrique. | 64 |
| Figure 3-8 : Système actif d'élastomère diélectrique (R., Pelrine et al., 2002) | 67 |
| Figure 4-1 : Centrifugeuse utilisée pour la mesure d'adhérence de la glace..... | 78 |
| Figure 4-2 : Montage de l'essai de traction givré | 80 |
| Figure 4-3 : Schéma de chargement : essai de traction | 82 |
| Figure 4-4 : Montage de l'essai de torsion givré..... | 86 |
| Figure 4-5 : Manchon d'attache de l'échantillon avec goupille de fixation..... | 87 |

| | |
|--|-----|
| Figure 4-6 : Support de glaçage pour l'essai de torsion | 87 |
| Figure 4-7 : Motorisation de la table de glaçage | 88 |
| Figure 4-8 : Schéma de chargement : essai de torsion | 91 |
| Figure 4-9 : Montage de l'essai de flexion givré | 96 |
| Figure 4-10 : Schéma de chargement : essai de flexion | 97 |
| Figure 4-11 : Schéma des échantillons de flexion | 99 |
| Figure 4-12 : Emplacement de l'axe neutre | 99 |
| Figure 4-13 : Système McKibben | 104 |
| Figure 4-14 : Montage du système McKibben | 105 |
| Figure 4-15 : Membrane IMPC | 107 |
| Figure 4-16 : Schéma partiel du montage vertical | 108 |
| Figure 4-17: Schéma du montage de caractérisation MFC | 110 |
| Figure 4-18: MFC soumis à un poids | 110 |
| Figure 5-1 : Charge en fonction de la déformation en traction du Nylon | 114 |
| Figure 5-2 : Déformation et charge en fonction du temps lors d'un essai de traction répété avec une lame en Al 2024 T3 non givré (-10 °C) | 115 |
| Figure 5-3 : Essai de traction répété avec une lame en Al 2024 T3 non givré | 115 |
| Figure 5-4 : Couple en fonction du cisaillement mesuré pour un tube percé et un tube non percé d'Al 2024 T3 | 117 |
| Figure 5-5 : Couple en fonction du cisaillement des tubes d'Al 2024 T3 sans glace | 118 |
| Figure 5-6 : Force en fonction de la déformation lors d'un essai de flexion répété avec une poutrelle d'Al 2024 T3 sans glace | 120 |
| Figure 6-1: Échantillon de glace typique de l'essai de traction givré | 127 |

| | |
|---|-----|
| Figure 6-2: Échantillon de glace typique de l'essai de torsion givré | 127 |
| Figure 6-3: Échantillon de glace typique de l'essai de flexion givré..... | 128 |
| Figure 6-4: Micrographie de glace produite en chambre climatique à -10 °C | 130 |
| Figure 6-5: Changement de pente graduel..... | 135 |
| Figure 6-6 : Changement de pente brusque | 136 |
| Figure 6-7 : Courbe obtenue à partir de l'enregistrement en fonction du temps du cisaillement à l'interface givré et du couple exercé sur le tube..... | 143 |
| Figure 6-8 : Courbe du couple en fonction du cisaillement..... | 144 |
| Figure 6-9: Câble toronné d'Al givré | 150 |
| Figure 6-10: Languettes de glace détachées lors de la torsion du câble toronné | 150 |
| Figure 6-11 : Courbe de la déformation et de la force appliquée en fonction du temps pour l'essai de flexion givré 20sepa4AM | 154 |
| Figure 6-12 : Cas 1 : Décollement sans fissuration (50% des essais filmés) | 157 |
| Figure 6-13 : Cas 2 : Décollement partiel avec fissuration (50% des essais filmés) | 157 |
| Figure 6-14 : Bris observé en torsion dans 70% des cas (Cas 1)..... | 159 |
| Figure 6-15 : Décollement observé en torsion dans 29% des cas (cas 3) | 160 |
| Figure 6-16 : Échantillon brisé par torsion (Al 2024 T3) produisant une fissuration à 45° sur l'axe de torsion | 161 |
| Figure 6-17 : Échantillon brisé par flexion (nylon) | 162 |
| Figure 6-18: Déflexion maximale d'une bande de membrane CPMI de 2 x 10 cm de long mesurée à température ambiante en fonction du voltage..... | 166 |
| Figure 6-19: Membrane CPMI glacée (-5 °C)..... | 167 |
| Figure 6-20: Membrane CPMI déglacée | 168 |

| | |
|--|-----|
| Figure 6-21: Contrainte normale (MPa) en fonction de la tension électrique (V) | 170 |
| Figure 6-22 : Contrainte normale (MPa) en fonction de la tension électrique (V) | 170 |
| Figure 7-1: Contrainte en cisaillement (MPa) en fonction de sa position x (mm) pour la traction d'une lame d'aluminium 2024 T3 recouverte de 5 mm de glace (5m7ess2) | 180 |
| Figure 7-2: Cisaillement et contrainte de rupture en fonction de la réciproque de l'épaisseur de glace d'un échantillon d'Al 2024 T3/GLACE..... | 183 |
| Figure 7-3: Cisaillement et contrainte de rupture en fonction de la réciproque de l'épaisseur de glace d'un échantillon de NYLON/GLACE..... | 183 |
| Figure 7-4: Déformation de rupture en flexion en fonction de l'épaisseur de glace pour l'Al 2024 T3 | 187 |
| Figure 7-5: Déformation de rupture en flexion en fonction de l'épaisseur de glace pour le NYLON | 187 |
| Figure 7-6: Contraintes de rupture normale et en cisaillement en fonction de l'épaisseur de glace pour l'Al 2024 T3..... | 188 |
| Figure 7-7: Contrainte de rupture normale et en cisaillement en fonction de l'épaisseur de glace pour le NYLON | 189 |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau 2-1 : Transitions ductile-fragile de la glace polycristalline non adhérée à une surface. | 33 |
| Tableau 2-2 : Valeurs d'adhérence de la glace selon différents auteurs..... | 45 |
| Tableau 3-1 : Sommaire des méthodes de déglaçage | 52 |
| Tableau 3-2 : Les principales catégories des systèmes/matériaux actifs | 56 |
| Tableau 3-3 : Principales propriétés actives des systèmes/matériaux actifs..... | 71 |
| Tableau 4-1 : Échantillons de traction | 81 |
| Tableau 4-2 : Équations et modèles applicables à l'essai de traction givré | 84 |
| Tableau 4-3 : Échantillons de torsion | 90 |
| Tableau 4-4 : Équations et modèles applicables à l'essai de torsion givré | 94 |
| Tableau 4-5 : Échantillons de flexion..... | 98 |
| Tableau 4-6 : Équations et modèles utilisés applicables à l'essai de flexion givré..... | 101 |
| Tableau 4-7 : Caractéristiques du fabricant : Muscle Sheet™ MS-417..... | 106 |
| Tableau 4-8 : Caractéristiques principales des MFC* (M 8557 P1 d33) | 109 |
| Tableau 5-1 : Pentes des droites de la Figure 5-5 | 119 |
| Tableau 5-2 : Imprécision des mesures et des calculs..... | 123 |
| Tableau 6-1 : Résultats des mesures expérimentales de la densité | 129 |
| Tableau 6-2: Rugosité des échantillons non glacés | 131 |
| Tableau 6-3: Adhérence de la glace à -10 °C mesurée par force centrifuge..... | 133 |
| Tableau 6-4 : Déformations de rupture en traction | 139 |
| Tableau 6-5 : Déformations de rupture des dépôts de glace en torsion sur l'Al 2024 T3..... | 145 |
| Tableau 6-6 : Déformations de rupture des dépôts de glace en torsion sur le NYLON | 146 |
| Tableau 6-7 : Déformation de rupture de glace en flexion | 152 |

| | |
|--|-----|
| Tableau 6-8: Augmentation du diamètre du muscle McKibben à différentes pressions | 164 |
| Tableau 6-9: Observations lors de l'activation du système McKibben givré | 164 |
| Tableau 7-1 : Contraintes calculées à partir de la force de rupture lors de l'essai de traction pour l'aluminium 2024 T3..... | 175 |
| Tableau 7-2 : Emplacements de l'axe neutre des lames composites alu et nylon/glace..... | 178 |
| Tableau 7-3 : Comparaison des trois modes de déformation..... | 193 |

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1. INTRODUCTION

1.1 INTRODUCTION

À l'époque de nos ancêtres, débarquant en Amérique du Nord, le rythme de vie était intimement relié au climat. L'été, les colons mettaient les bouchées doubles pour arriver avant l'hiver avec de quoi survivre pendant toute cette période sombre. Lorsque les bernaches partaient à l'automne, à l'arrivée des premières glaces, les gens ralentissaient leurs activités et se préparaient à passer les longs mois de l'hiver. L'industrialisation amena un nouveau rythme de travail où on devait rouler à plein régime, et ça, au-delà des saisons. Aujourd'hui, beau temps mauvais temps, les gens doivent travailler. Pour ce faire, les femmes et les hommes ont dû affronter des problèmes propres au climat nordique et user de leur ingéniosité pour inventer ou s'adapter à notre climat. Depuis ce temps, plusieurs solutions ont été trouvées, mais le défi demeure toujours. L'industrie a un besoin constant de nouvelles solutions à leurs problématiques reliées au climat nordique. Les problèmes restent encore nombreux et diversifiés. Ceux reliés aux transports en sont des exemples parfaits car ils sont les mieux connus. Le dégivrage au sol des avions est maintenant un processus normé et bien contrôlé. Cependant, pour l'industrie aérienne la bataille contre la glace n'est pas entièrement gagnée. La **Figure 1-1** montre un avion de Southwest Airlines ayant manqué son atterrissage pendant une tempête hivernale à Chicago en 2005. On travaille toujours à l'amélioration des fluides antigel ou au dégivrage de composantes particulières par exemple, les joints de porte ou les pistes d'atterrissage.



Figure 1-1 : Atterrissage manqué, Chicago 2005

Au Québec, l'exploitation de l'hydroélectricité étant une activité importante, un effort collectif est donné afin d'étudier et améliorer la résistance à l'accumulation de glace des réseaux de transports d'électricité. La vulnérabilité de ces réseaux a été démontrée lors de la "crise du verglas" de janvier 1998 dans la région de la Montérégie où une bonne partie des activités quotidiennes a été paralysée (Figure 1-2). Au cours des années, diverses stratégies associées à différents moyens de dégivrage, passifs ou actifs, mécaniques ou thermiques, ont été développées de façon à pouvoir assurer le maximum de fiabilité des réseaux électriques.



Figure 1-2 : Lignes électriques givrées

Sur le plan commercial, il existe seulement une méthode utilisée au Japon pour dégeler et prévenir la déposition de neige mouillée sur les lignes électriques. Cette méthode consiste en une gaine ferromagnétique chauffante par courants de Foucault induits en courant alternatif enveloppant les conducteurs (T., Yamamoto et al. 1990). Alors, que font les compagnies d'électricité lorsque survient un épisode de verglas? Quelques-unes, comme Manitoba-Hydro (Manitoba-Hydro, 1994), ont développé leurs propres méthodes utilisant de différentes façons l'énergie fournie par les conducteurs pour faire fondre la glace ou utilisent des moyens

mécaniques comme les rouleaux pour briser la glace. Cependant, ces méthodes présentent encore beaucoup d'inconvénients car elles sont énergivores et demandent beaucoup de gestion car elle nécessite un arrêt des opérations régulières.

Malgré tous les efforts des chercheurs pour arriver à trouver une méthode simple, efficace et peu coûteuse pour dégeler, aucune solution universelle n'a encore été trouvée. La solution rêvée serait sans doute une substance à bon marché, non dommageable pour l'environnement, facilement applicable de façon permanente sur tous les types de surfaces qui empêcherait la glace de s'y accumuler. Toutefois, même si certaines substances solides peuvent réduire l'adhérence de la glace, aucune n'est encore assez efficace pour être utilisée comme une solution fiable aux problèmes de givrage (C., Laforte, 2001). En effet, l'eau qui est souvent appelée "solvant universel" par les chimistes est une molécule spéciale possédant des affinités chimiques avec la plupart des substances et pouvant se lier par liaison hydrogène avec certaines substances. L'adhérence de la glace sur certaines substances solides peut être diminuée mais pas suffisamment pour empêcher la glace de s'y accumuler ou de favoriser le délestage naturel.

Au début, ce projet voulait proposer une nouvelle approche consistant à additionner à la réduction d'adhérence des revêtements *glaçophobes* déjà développés, l'énergie mécanique provenant d'un matériau sous-jacent déformable. En effet, pour une couche de glace de 2 mm, l'énergie mécanique d'adhérence à l'interface glace/substrat est 1000 fois plus faible que celle utilisée lors d'un déglaçage thermique (C., Laforte, 2001). Il serait donc énergiquement favorable de dégeler en appliquant l'énergie mécanique principalement à l'interface. La nouvelle approche proposée utiliserait donc un matériau sensible aux faibles stimuli électriques

générant une énergie mécanique concentrée à l'interface glace/substrat. Ces matériaux dits "intelligents" pourraient être par exemple, les polymères à conductivité ionique intrinsèque récemment expérimentés comme tendons artificiels ou des céramiques aux comportements électrostrictifs ou piézoélectriques (E. V., White, 2005; Y., Bar-Cohen, 2002; Y., Bar-Cohen, 2001; Y., Bar-Cohen, 1999;). Ce qui rend ces matériaux particulièrement intéressants est que leurs réponses aux stimuli sont partiellement contrôlables, réversibles et reproductibles. Pour cette raison, on s'y intéresse dans plusieurs domaines de recherche, dont ceux de la chimie, de la médecine, des télécommunications, de l'électronique et de la robotique. Dans certains cas, des avances considérables ont déjà été atteintes comme dans les domaines des technologies médicales et de la robotique.

Non seulement les matériaux électroactifs offrent l'avantage de répondre à des stimuli électriques, mais ils offrent également toute une gamme d'avantages liés à leurs propriétés comme leur élasticité et leur facilité d'agencement avec d'autres matériaux. Ces avantages permettent d'envisager leurs applications autant à des microstructures de la taille d'un insecte qu'à des macrostructures offrant la flexibilité et la force d'un muscle animal. Pour le dégivrage, le matériau doit réagir rapidement à un faible stimulus électrique et la déformation produite à l'interface doit générer une contrainte assez forte pour casser ou décoller la couche de glace qui s'y est accumulée. On entend par matériaux électroactifs toutes substances possédant la capacité de produire une énergie mécanique, chimique ou optique lorsqu'elles sont agencées de manière à être électriquement stimulées. Prenons comme exemple le silicium, considéré électrostrictif lorsqu'il est agencé à un ensemble de composantes (fils, électrodes, source de

tension, etc.) et stimulé de manière à produire de l'électrostriction. L'ensemble comprenant le matériau et les composantes d'activation sera appelé : système/matériau actif.

1.2 PROBLÉMATIQUE SPÉCIFIQUE

Malheureusement, l'état actuel du développement des systèmes/matériaux actifs n'est pas encore assez avancé pour leur utilisation directe pour le déglaçage. En effet, si plusieurs matériaux sont disponibles commercialement, les dispositifs nécessaires à leur activation et surtout leur contrôle ne le sont pas. Donc, pour développer un système déglaçant avec une membrane électroactive, les chercheurs doivent bien connaître le mécanisme de déglaçage obtenu par déformation du substrat d'une surface glacée. Or, les données sur le sujet sont parcimonieuses et rarissimes. Tous les résultats d'essais de déglaçage mécaniques publiés réfèrent non pas aux déformations mesurées mais uniquement aux contraintes moyennes calculées à partir de la force mesurée et des données géométriques. De plus, pour la plupart de ces essais, le déglaçage est obtenu en exerçant la force directement sur la glace. Pour cette thèse, il apparaît donc nécessaire d'acquérir des données expérimentales de déformation lorsque la surface glacée d'un substrat est déformée mécaniquement jusqu'à la rupture ou au décollement du dépôt de glace.

1.3 OBJECTIFS

1.3.1 Objectif principal

De façon à bien comprendre le mécanisme de déglaçage lors de la déformation d'une surface glacée, le travail de recherche a comme objectif principal de :

Déterminer expérimentalement le niveau de déformation du substrat produisant le décollement ou le bris de la glace y adhérant en torsion, traction et flexion.

1.3.2 Objectifs secondaires

Développer trois montages expérimentaux afin de mesurer directement la déformation de rupture d'un substrat givré en traction, torsion et flexion. Les déformations de rupture devront être évaluées à trois épaisseur de glace soit 2,5 et 10 mm et à vitesse de chargement variable. Avec les mesures de déformation et de force à la rupture, les contraintes de rupture dans la glace seront évaluées de façon simple. Ces données fourniront aux futurs concepteurs de systèmes déglaçant des indications sur le mode de chargement, l'épaisseur et la vitesse à laquelle le déglaçage sera facilité. De plus, la thèse veut présenter les résultats de quelques essais de déglaçage avec des matériaux électroactifs afin de montrer leurs limitations dans l'état actuel de développement.

1.4 MÉTHODOLOGIE

Afin de recueillir des données non disponibles dans la littérature sur la déformation d'une surface glacée, trois (3) nouveaux montages mesurant la déformation de rupture d'un échantillon glace/substrat en traction, torsion et flexion ont été développés. Les trois montages permettent d'appliquer une force en traction, torsion ou flexion directement sur un substrat

préalablement glacé afin de produire la déformation nécessaire au déglaçage. Pendant l'essai, la déformation et la force ou le couple appliqué sont mesurés en temps réel par une jauge de déformation, une cellule de charge ou un dynamomètre. Le moment du déglaçage est déterminé à partir du graphique de la déformation car lors de la fissuration ou le décollement de la glace sur le substrat, il y a perte de rigidité de l'échantillon produisant un saut distinctif dans l'enregistrement.

De plus, des essais de déglaçage ont été effectués afin d'analyser le potentiel déglaçant de trois différents systèmes/matériaux actifs disponibles commercialement soit : le muscle pneumatique McKibben (G. K., Klute et al. 1999), une membrane composite de polymère-métal (*MuscleSheet™*) CPMI (M., Shahinpoor et al. 1999) et un composite de céramique piézoélectrique (SmartMaterial) MFC.

1.5 ORIGINALITÉS DE LA THÈSE

La nouveauté de la thèse réside dans l'approche et la méthodologie. L'approche consistant à étudier le déglaçage par déformation du substrat sans agir directement sur la glace est totalement nouvelle. Pour la première fois, des mesures directes de déformations et du taux de déformation ont été prises lors du déglaçage d'un échantillon composite glace/substrat en traction et torsion. Cette nouveauté dans l'approche a nécessité une nouvelle méthodologie où deux montages ont été spécifiquement conçus et développés pour mesurer la déformation d'un composite glace/substrat en traction et torsion sans manipulation directe de la glace. De plus, un montage en flexion (C., Blackburn et al., 2000) a été modifié pour se conformer aux montages en traction et torsion. Ainsi, pour la première fois, il est possible de comparer le

comportement d'un composite glace/substrat sollicité en déformation selon trois modes de déformation différents dans des conditions d'essai maintenues constantes d'un mode à l'autre. Ces mesures et analyses permettront de définir les critères comme le niveau et la vitesse de déformation, selon la nature du substrat et l'épaisseur de glace que doivent respecter les systèmes déglaçant.

Ces éléments nouveaux dont l'approche étudiant un composite glace/substrat en déformation sans action directe à la glace et la méthodologie mesurant la déformation confèrent à la thèse son originalité qui saura intéresser grandement les concepteurs de systèmes déglaçant. En ce sens, la revue des méthodes de déglaçage sera présentée d'une nouvelle façon, soit en classant les méthodes selon le type de transfert de l'énergie de déglaçage : directement à la glace ou via le substrat glacé.

1.6 PLAN DE TRAVAIL

Cette thèse est divisée en huit (8) chapitres. Le **chapitre 1** introduit le sujet de recherche avec sa problématique, les objectifs et la méthodologie utilisée. Le **chapitre 2** est consacré à la glace polycristalline et ses propriétés mécaniques. Après une revue de la nomenclature, on y définit les contraintes et les déformations en tension, compression et cisaillement s'exerçant dans la glace pour les deux régimes de déformation soit ductile et fragile. Ce chapitre explique également le phénomène de l'adhérence de la glace et les méthodes de mesure généralement utilisées. Le **chapitre 3** présente une revue littéraire des méthodes de déglaçage, des principaux matériaux électroactifs et de système/matériaux actifs susceptibles d'utilisation pour le

déglaçage. Le **chapitre 4** décrit les nouveaux montages mis au point spécifiquement pour déterminer la déformation nécessaire au bris (fissuration et décollement de la glace) d'un échantillon givré.

Le **chapitre 5** présente la validation des nouveaux montages. Par la suite, tous les résultats sont présentés au **chapitre 6**. Le chapitre commence par la caractérisation des substrats et de la glace étudiée. Une analyse des photos et des vidéos permet de distinguer le type de bris observés. Les résultats des essais de déformation en traction, torsion et flexion y sont présentés sous forme de tableaux en fonction de l'épaisseur de glace et du taux de déformation utilisé. Le chapitre termine en présentant les résultats qualitatifs des essais de déglaçage avec trois (3) système/matériaux actifs. Le **chapitre 7** discute des résultats obtenus et définit les paramètres que doit respecter un système de déglaçage mécanique par déformation du substrat pour être efficace. Le **chapitre 8** termine avec les grandes conclusions et recommandations qu'il est possible de tirer du travail. La thèse se termine par la bibliographie au **chapitre 9** et la section des annexes. Cette dernière présente les différents protocoles expérimentaux ainsi que des exemples des fiches des essais effectués et les calculs si rattachant.

CHAPITRE 2

LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DE LA GLACE

POLYCRYSTALLINE

2. LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DE LA GLACE POLYCRYSTALLINE ET MESURES D'ADHÉRENCE

Cette section traite de la résistance mécanique de la glace et de leurs techniques de mesure. Les propriétés mécaniques sont présentées en 4 sous-sections. La première section présente les propriétés mécaniques de la glace polycristalline déterminées à l'aide d'essais conventionnels. La seconde section présente les propriétés mécaniques de la glace sous forme de couche de glace accrétée sur un substrat. Sous cette forme, seule la propriété d'adhérence aux surfaces est présentée en littérature, aucunes études plus générales sur ses propriétés mécaniques ne sont disponibles.

Pour finir, des essais mécaniques utilisant la déformation d'un substrat pour mesurer l'adhérence de la glace ou de différents revêtements, comme les peintures et les adhésifs seront décrits.

Malheureusement, aucune donnée sur des mesures précises de déformation de rupture n'a été trouvée en littérature.

2.1 LA GLACE POLYCRYSTALLINE

2.1.1 Nomenclature

La glace est un matériau à maille cristalline hexagonale. Comme les matériaux cristallins, les propriétés de la glace sont fortement liées à sa microstructure caractérisée par la taille et l'arrangement des grains de même que par la grosseur et le nombre de pores. Ces derniers déterminent la densité et le degré de transparence de la glace. On distingue trois grands types

de glace atmosphérique ou polycristalline : le verglas, le givre dur et le givre léger. Le verglas est une glace lisse et transparente à densité proche de la densité théorique maximale soit de 0,92. Le givre dur ou le givre lourd est une glace opaque ou semi-transparente de densité variant de 0,5 à 0,9 possédant un fini de surface écaillée. Le givre léger est une glace opaque avec un fini de surface en aiguille et de densité inférieure à 0,5. La glace produite en chambre climatique pour les besoins des essais de cette thèse est un givre lourd.

2.1.2 Transition ductile-fragile de la glace polycristalline

La glace polycristalline est un matériau viscoélastique. À faibles vitesses de chargement, dépendamment de la température, la glace peut se déformer plastiquement et se rupturer de façon ductile. Par contre, à vitesse élevée de chargement, la glace se déforme de façon élastique et se rompt de façon fragile. La transition entre les domaines ductile et fragile est caractérisée par la valeur du taux de déformation à laquelle elle est observée. Cette transition varie selon le type de glace, la température ainsi que le type de la contrainte appliquée. Au-delà de ce taux de transition, la glace présente un comportement fragile où les contraintes de rupture deviennent indépendantes du taux de déformation. Le Tableau 2-1 présente l'ordre de grandeur des taux de déformation qui ont été déterminés expérimentalement par différents auteurs sur des échantillons de glace polycristalline à différentes températures et pour trois types de contraintes appliquées.

Les essais réalisés par Hawkes et Mellor, tabulés dans le livre de Michel (B., Michel, 1978), démontrent une transition à un taux de déformation compris entre 10^{-5} et 10^{-6} s^{-1} pour des essais en tension réalisés à -10°C . En compression, les taux de déformation de transition sont

plus élevés qu'en tension valant de 10^{-3} à 10^{-4} s⁻¹ à différentes températures. En cisaillement, un seul ouvrage où la glace subit des essais en **cisaillement pur** à différentes vitesses a été répertorié. Il s'agit d'essais réalisés dans le cadre d'une maîtrise à l'Université du Québec à Chicoutimi par Julien Bilodeau (J., Bilodeau, 1996). La transition de ductile à fragile a été déterminée à 3×10^{-2} s⁻¹ à -14 ± 1 °C. Cependant, le taux de cisaillement des essais n'a pas été mesuré mais plutôt calculé et ce résultat n'a pas été validé par d'autres auteurs.

Tableau 2-1 : Transitions ductile-fragile de la glace polycristalline non adhérée à une surface

| Auteurs | Gold, 1977 | Hawkes et Mellor, 1972 | Bilodeau, 1996 |
|-------------------------|------------------------------|------------------------|--------------------|
| Taux (s ⁻¹) | — | 10^{-6} | ---- |
| Tension | | | |
| Taux (s ⁻¹) | Entre 10^{-4} et 10^{-3} | 10^{-3} | ---- |
| Compression | | | |
| Taux (s ⁻¹) | ---- | ---- | 3×10^{-2} |
| Cisaillement | | | |
| Température (°C) | Non mentionnée | -10 | -14 ± 1 |

2.1.3 Mécanisme de déformation fragile

En mode fragile, la contrainte nécessaire à l'apparition d'une fissure dépend seulement de la **température**, de la **microstructure** de la glace et **du type de chargement**. Dans le domaine élastique, la déformation est principalement due à l'étirement des liens intermoléculaires. Lorsque la contrainte est suffisamment élevée, une microfissure dans le plan de base se produit

et l'énergie élastique emmagasinée est relâchée. Le plan de base aux indices (0001) correspond aux faces supérieures et inférieures de l'hexagone. Par ce plan, la microfissure se propage instantanément dans l'échantillon lorsqu'il est soumis à une tension. En compression, pour qu'il y ait rupture de l'échantillon, une contrainte supplémentaire doit être exercée pour que la fissure puisse se propager au travers de celui-ci.

2.1.4 Mécanisme de déformation ductile

La déformation ductile ou plastique fait intervenir le glissement des plans de base occasionné par le déplacement des dislocations de la glace. Ces dislocations sont principalement des défauts linéaires de type vis et/ou coin. Contrairement aux métaux où tous les atomes sont identiques et liés par des liens métalliques non directionnels, la glace est constituée d'atomes d'oxygène et d'hydrogène de tailles différentes fortement liées par des liens directionnels mixtes. Ce qui fait que les dislocations sont sessiles et ne peuvent se déplacer que par la montée, un phénomène de diffusion lacunaire favorisée au voisinage du point de fusion.

2.1.5 Modules de Young et de Coulomb de la glace polycristalline

Les deux principaux facteurs affectant les modules élastiques de la glace polycristalline sont la température et la porosité de la glace. Selon les données publiées par différents auteurs dans l'ouvrage de Bernard Michel (B., Michel, 1978), le module d'Young d'une glace de densité maximale varie entre 9,2 et 9,9* GPa, le module de Coulomb entre 3,36 et 3,80 GPa, et le coefficient de Poisson entre 0,31 et 0,36. Dans cette thèse, la glace est considérée de rigidité maximale, soit un module d'Young de 9,9 GPa et de cisaillement de 3,80 GPa.

* mesurée par méthode ultrasonique

2.2 RÉSISTANCE DE LA GLACE POLYCRYSTALLINE

2.2.1 Résistance en tension et compression

La résistance de la glace est la valeur de la contrainte à laquelle la glace se rompt lorsqu'elle est soumise à une tension ou une compression. Généralement, ces contraintes augmentent proportionnellement avec le taux de déformation jusqu'à ce qu'elles atteignent leur limite de fragilité au taux de transition ductile-fragile décrit précédemment. Le groupe de recherche en Ingénierie de l'environnement atmosphérique, GRIEA de l'Université du Québec à Chicoutimi, a mesuré de façon conventionnelle ces contraintes de rupture. La Figure 2-1 montre la courbe obtenue pour une glace polycristalline à -14°C . Le profil, comportant deux plateaux, illustre bien le comportement dynamique différent entre la compression et la tension. La contrainte de rupture fragile en tension vaut **2,6 MPa** pour un taux de $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ tandis que celle en compression vaut environ 4 fois plus avec **11,1 MPa** pour un taux d'environ $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$.

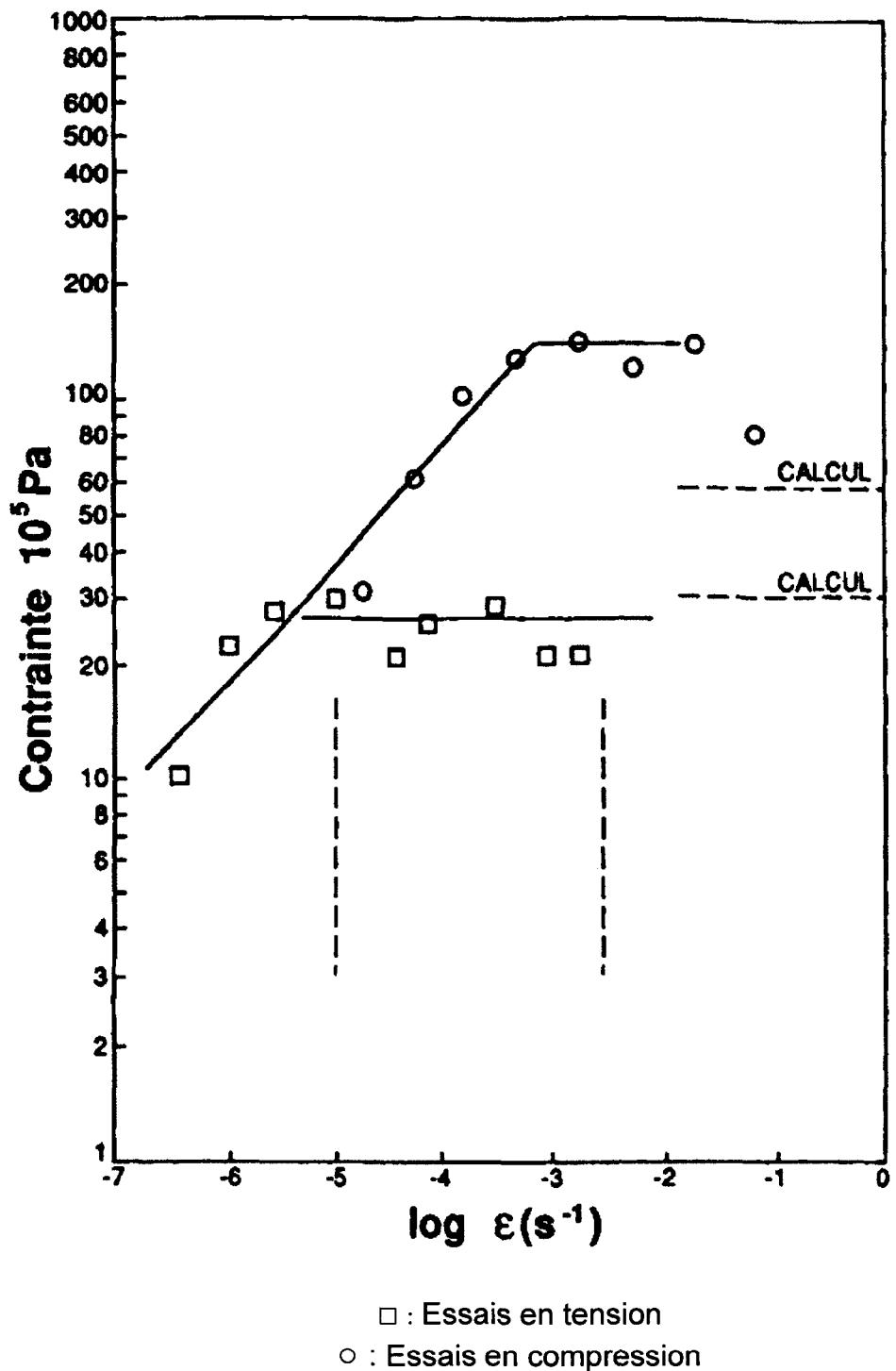


Figure 2-1 : Résistance en tension et en compression du givre dur à -14°C en fonction du taux de déformation (Laforte et al., 1994)

En appliquant un critère de rupture défini par Michel (B., Michel, 1978), on peut également montrer que la résistance de la glace polycristalline en régime fragile est fonction de la température θ et de la taille moyenne des grains d^* selon la relation suivante :

$$\sigma_{tension\ fragile} = 7,94 \times 10^4 \sqrt{\frac{1 - (0,9 \times 10^{-3} \times \theta)}{d^*}} \text{ (Pa)}^* \quad \text{Équation 2-1}$$

Où : θ = valeur absolue de la température en Celcius

d^* = $1,17 d_{moyen}$ du grain de glace en mètre

Le facteur 1,17 permet de convertir le diamètre de cristaux colomnaires d_{moyen} en celui de cristaux sphériques.

Par exemple, à -10°C pour une glace à grains colomnaires de 1 mm de diamètre, la contrainte de rupture calculée selon cette équation est de **2,3 MPa**.

2.2.2 Résistance en cisaillement

Le comportement de la glace non confinée sollicitée en cisaillement pur a été très peu étudié.

Par contre, il a été maintes fois étudié à l'interface glace/matériau dans des essais d'adhérence où différents montages ont été utilisés (voir la section 2.3.3). Cependant, une étude effectuée par Bilodeau (J., Bilodeau, 1996) dans le cadre d'un travail de maîtrise a permis de déterminer les propriétés en cisaillement de la glace atmosphérique lors d'essais réalisés à -14°C à des taux de déformation variant de $0,0001$ à 40 s^{-1} .

* Développée pour la glace de modules élastiques de 9,9 GPa (E_{33}) et 3,8 GPa (G_{66})

La résistance au cisaillement de la glace confinée partiellement a été mesurée par une méthode de poinçonnage utilisant une presse mécanique à vitesse de déplacement contrôlé. Ces essais consistent à poinçonner le bout d'un échantillon cylindrique jusqu'à sa rupture tout en mesurant la force appliquée par le poinçon. Les courbes de la contrainte de rupture en fonction du taux de déformation sont de types polynomiaux de second ordre (**Figure 2-2**). La transition ductile-fragile se traduit par un sommet à 1,3 MPa au voisinage de $0,01\text{ s}^{-1}$, les valeurs de contraintes diminuant après ce sommet. Malheureusement, aucune mesure directe de la déformation n'a été prise lors des expérimentations. Le taux de déformation n'a pas été mesuré mais seulement évalué à partir de la vitesse de la traverse de la machine de traction en relation avec le modèle géométrique de l'échantillon utilisé.

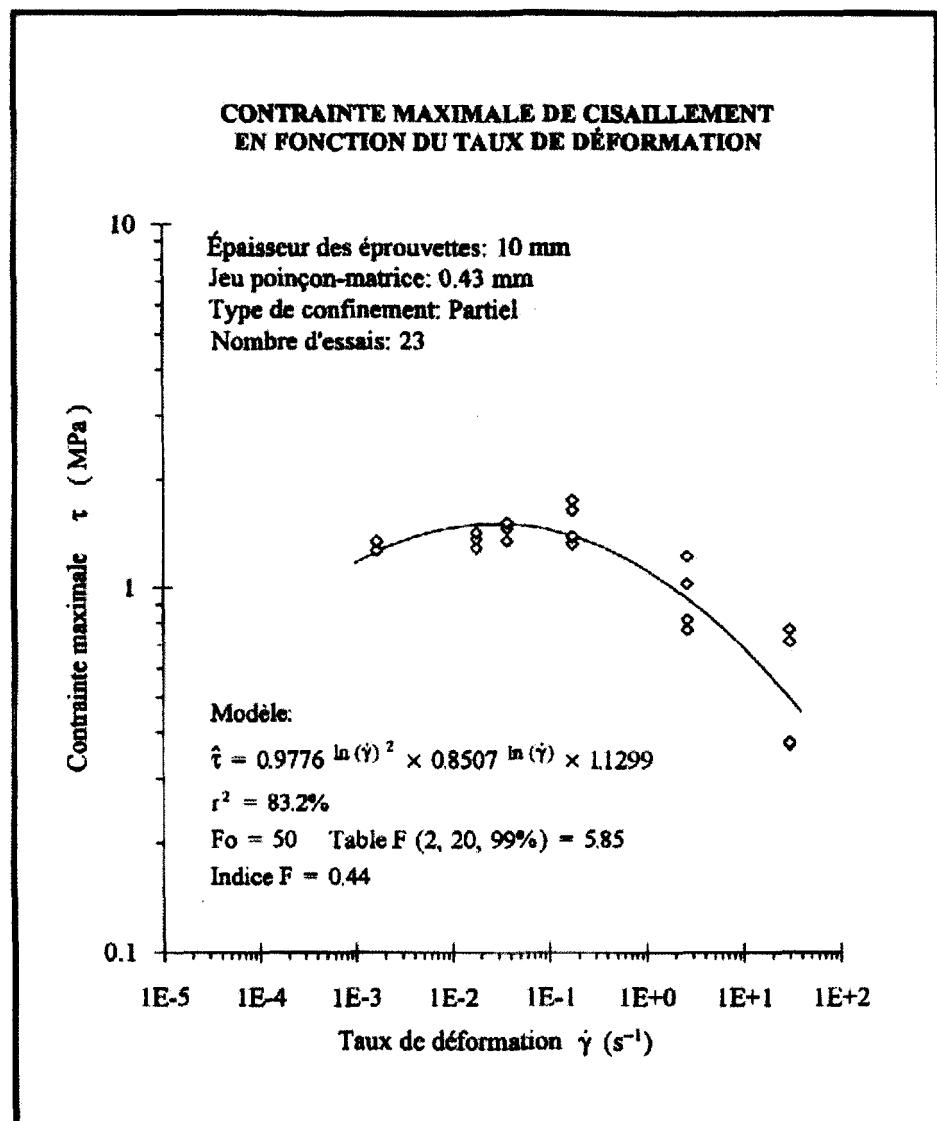


Figure 2-2 : Contrainte de rupture en fonction du taux de déformation (J. Bilodeau, 1996)

2.3 LA GLACE POLYCRYSTALLINE SOUS FORME DE GLACE ACCRÉTÉE SUR UNE SURFACE

2.3.1 Structure de la couche de glace polycristalline accrétée

Une couche de glace polycristalline accrétée à une surface se distingue de la glace polycristalline non accrétée par sa microstructure. À l'interface glace/substrat, la microstructure de la glace (porosité, pureté et structure cristalline) peut différer de façon assez importante pour en modifier le comportement mécanique. Visuellement, il est parfois possible de distinguer un changement dans la transparence de la glace proche de l'interface où la glace est souvent plus opaque. La Figure 2-3 est une micrographie d'une couche de glace perpendiculaire à la surface obtenue en soufflerie réfrigérée à -20 °C par pulvérisation d'eau sur un substrat de silicone. Sur cette micrographie, dont une graduation correspond à un millimètre, les grains situés près de l'interface (au bas de la photo) sont plus petits qu'à la surface de la glace.

Dans la littérature, on trouve deux modèles de cette couche intermédiaire entre le substrat et la glace. Le premier, à l'échelle atomique, est celui de la présence à l'interface d'une couche de glace solide amorphe comme un liquide ou en terme anglais *liquid-like layer*. Selon Jellinek, (H.H.G., Jellinek, 1962 ; H.H.G., Jellinek, 1959) sa présence expliquerait le comportement contradictoire de la glace lorsqu'elle est soumise en tension et en cisaillement. En cisaillement, seules les forces de friction seraient impliquées tandis qu'en tension, cette friction serait accompagnée des forces liées à la tension superficielle. En considérant cette couche comme un fluide Newtonien, Jellinek estime, à partir de ses résultats expérimentaux, l'épaisseur de cette couche à cent (100) atomes. Les propriétés de cette couche seraient influencées par la nature et la rugosité du substrat de même que la température de formation.

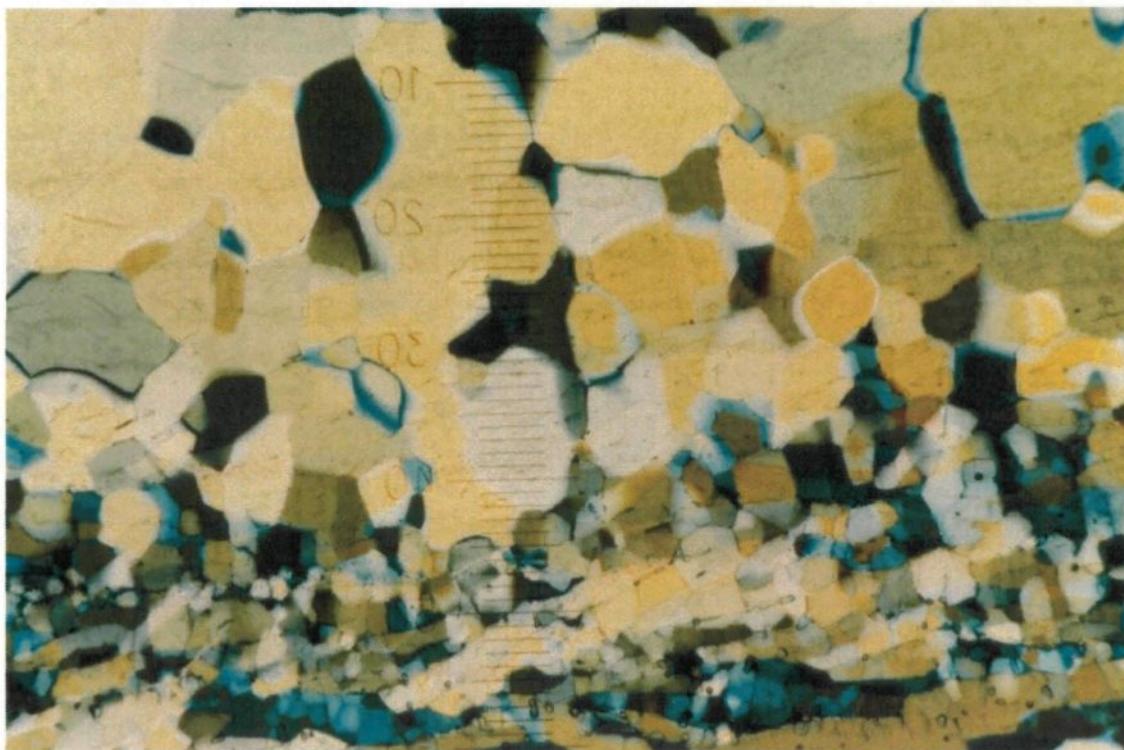


Figure 2-3 : Micrographie d'une coupe perpendiculaire à la surface d'une couche de glace accrétée en soufflerie réfrigérée (grossissement : 15,5 x)

Le deuxième modèle est celui de la présence à l'interface d'une couche limite faible de densité et pureté différentes de celles de l'ensemble de la couche de la glace. Dans ce modèle, la rupture se produit à l'intérieur de la couche limite avoisinant l'interface glace/substrat. La rupture entre la glace et le substrat proviendrait alors des imperfections du réseau (Lliboutry, 1964). Dans plusieurs cas de rupture de la glace, on observe à la surface du substrat une mince couche de glace encore en place (C., Laforte, 2001; L.D., Minsk, 1982). La rupture serait donc plutôt cohésive qu'adhésive c'est-à-dire que la couche de glace se rompt au lieu de décoller de la surface.

2.3.2 Mécanismes d'adhérence

Il existe trois principaux mécanismes pouvant expliquer l'adhérence de la glace aux surfaces :

- 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 (H., 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 (E.H., Andrews et al., 1984; M., Landy et A., Freiberger, 1967).

- Chimique

L'adhérence de la glace est attribuable aux forces de liaison intermoléculaires de Van der Waals. À l'interface glace/substrat on retrouverait des liens dispersifs de London et dans certains cas, des liens hydrogènes (V. K, Croucht,. R. A, Hartley, 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 diminuent, occasionnant une diminution de l'adhérence de la glace (L., Andersson et al., 1994). Également, plus la tension de surface d'un substrat est basse, moins l'eau le mouille et moins la glace y adhère (M., Yoshida 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 (V.K., Petrenko, 1994).

2.3.3 La mesure de l'adhérence de la glace

Il existe plusieurs façons de mesurer l'adhérence de la glace. Pour la grande majorité, l'essai d'adhérence consiste à exercer une force sur un échantillon de glace pris en sandwich entre deux substrats soit en tension, compression ou en torsion produisant un cisaillement sur la glace. Le spécimen de glace peut prendre une forme cylindrique (H.H.G, Jellinek, 1959) ou une forme rectangulaire (M., Landy et A., Freiberger, 1967). De plus, la force de cisaillement peut être appliquée en torsion (V.K., Crutch et R.A., Hartley, 1992). Dans toutes ces méthodes, la glace est confinée dans un espace où elle est soumise directement à la charge et l'échantillon de glace est obtenu en faisant geler sur le substrat un volume d'eau donné. Cette façon de faire permet donc d'obtenir un seul type de glace qui ne représente pas vraiment la glace atmosphérique 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 centrifuge créée lors de la rotation de pâles d'hélicoptères en mesurant avec des jauge de déformation la contrainte provoquée au moment du décollement de la glace (J.R., Stallabrass et R.D., Price, 1962). Cette méthode est difficile d'application car elle utilise des pâles d'hélicoptères de dimensions non négligeables. Le second type d'essai, le *peel test* consiste à mesurer la force de décollement d'un plastique détachée d'une couche de glace à l'aide d'un

levier d'acier inoxydable ou d'aluminium couplé à un appareil de traction mesurant la force d'arrachement (R.J., Scavuzzo et M.L., Chu, 1994). Ce type d'essai est très rarement utilisé et ne peut être utilisé qu'avec des substrats polymériques flexibles.

Finalement, deux nouvelles méthodes de mesure d'adhérence ont été développées récemment au Laboratoire des matériaux antigivre (LIMA). Sommairement, la première consiste en la mesure du cisaillement à l'interface glace-substrat lors de la flexion d'une lame glacée au moment du bris du dépôt de glace (C., Blackburn et al., 2000). Cette méthode a été adaptée pour les mesures en flexion de cette thèse et sera décrite à la section 4.5. La deuxième méthode utilise une centrifugeuse et le calcul du cisaillement nécessaire au décollement d'un morceau de glace adhérant à une surface. Cette méthode sera utilisée pour évaluer l'adhérence de la glace aux différents substrats étudiés dans cette thèse (section 4.2). Les deux grands avantages de ces méthodes sont que les revêtements peuvent être appliqués facilement sur les échantillons et que la glace est formée à partir de gouttelettes surfondues générées en chambre froide. Les conditions expérimentales simulées sont donc très proches de celles des précipitations givrantes rencontrées dans la nature.

2.3.4 Variabilité dans les valeurs d'adhérence de la glace

La multitude de facteurs influençant l'adhérence de la glace crée des disparités entre les valeurs d'adhérence de la glace mesurées par différents auteurs. Ramanathan et ses collègues ont publié un tableau colligeant les différentes valeurs d'adhérence publiées dans la littérature démontrant bien cette disparité. Une adaptation libre du tableau de Ramanatha est présentée au Tableau 2-2.

Tableau 2-2 : Valeurs d'adhérence de la glace selon différents auteurs *

| | Auteurs | Types de glace | Méthodes | Substrats | $\tau_{adhérence}$ (MPa) |
|----|----------------------|--|--|-----------------|---------------------------------------|
| 1 | Loughborough et Hass | Eau congelée | Centrifuge | Al Cu | 1,52 0,85 |
| 2 | Druez et al. | Verglas et givre accrétés sur un conducteur | | Al | 0,067 à 0,4 |
| 3 | Phan et al. | | | | |
| 4 | Laforte et al. | | | | |
| 5 | Raraty et Tabor | Eau congelée | Centrifuge | Acier inox | 1,96 |
| 6 | Jellinek | Glace de neige | Glace en sandwich entre deux plaques d'acier inox cisaiillées en torsion | Acier inox | 0 à 1,65 (0 à -14 °C) |
| 7 | Bascom et al. | Eau congelée | Méthode des plaques parallèles en mode quasi statique | Acier inox poli | 1,63 |
| 8 | Ford et Nichols | Eau congelée | Méthode des plaques parallèles en mode quasi statique | Acier inox poli | 0,24 |
| 9 | Stallbrass et Price | Accrétée par impact dans une soufflerie réfrigérée | Centrifuge | Al | 0,026-0,127 (-15 à -6,7 °C) |
| 10 | Itagaki | Accrétée par impact | Centrifuge | Al | 0,157 (-5 °C) |
| 11 | Reich | Eau congelée | Méthode des plaques parallèles en mode quasi statique | Al | 0,827-0,930 (-11 °C) |
| 12 | Chu et Scavuzzo | Accrétée par impact dans une soufflerie réfrigérée | Méthode des plaques parallèles en mode quasi statique | Al | 0 à 1,03 (-4 à 0 °C) |

* Adaptation du tableau 1 de *Deicing of Helicopter Blades using piezoelectric Actuators* par S. Ramanathan, V.V. Vasundara et V.K. Varadan, RCEEAM, Pennsylvania State University

Le tableau présente les valeurs d'adhérence de la glace aux métaux mesurée par douze (12) différents groupes d'auteurs et spécifie le type de glace étudiée ainsi que la méthode de mesure utilisée. L'adhérence de la glace est un phénomène difficilement quantifiable. Par exemple, les lignes 7 et 8 du tableau donnent les valeurs d'adhérence de la glace congelée sur de l'acier inoxydable poli mesurées avec la méthode des plaques parallèles. Les deux groupes d'auteurs différents ont obtenu des valeurs d'adhérence de 1,63 et 0,24 MPa. L'adhérence mesurée par Ford et Nichols est donc 7 fois plus élevée que celle mesurée par Bascom et ses collègues. La température d'essais n'étant pas spécifiée, il est difficile d'expliquer la différence appréciable entre les deux valeurs. Contrairement au module d'Young de la glace dont les nombreuses valeurs déterminées expérimentalement s'accordent avec la théorie, l'adhérence de la glace à différentes surfaces présente des variations considérables. Pour cette raison, il est préférable d'en faire la mesure dans des conditions très précises (type de glace, conditions atmosphériques, type de sollicitation et caractéristiques du substrat).

2.4 TECHNIQUE DE MESURE D'ADHÉRENCE PAR DÉFORMATION DU SUBSTRAT

2.4.1 Mesure d'adhérence de la glace

Wei et ses collègues de l'université Clarkson (Y., Wei et al., 1996) ont déterminé l'énergie de fracture de l'interface glace/métal soumise à une flexion entre quatre points (*four point bending*). L'énergie de fracture a été évaluée à partir du moment de flexion appliquée, du module d'Young et du coefficient de Poisson. Sur la base de la théorie des poutres Euler-Bernouilli, l'énergie critique de fracture de l'interface glace/aluminium à -15°C a été évaluée à 1 J/m^2 . Après avoir mesuré cette énergie et analysé par fractographie les ruptures obtenues sous différentes conditions d'essai, Wei et al. concluent que le type de glace et le processus de formation de l'interface influencent l'énergie de fracture.

Une autre méthode de mesure d'adhérence utilisant une poutre en déformation préalablement glacée est proposée par Archer et Gupta (P., Archer et V., Gupta, 1998). La méthode consiste sommairement à soumettre une lame d'aluminium de 1 mm d'épais préalablement recouverte d'une couche de glace d'environ 0,8 mm à une pulsation laser produisant une onde en tension à la surface de la glace. La force est calculée à partir de la vitesse de l'onde de surface et par simulation d'ondes mécaniques. Selon cette méthode, l'adhérence de la glace sur l'aluminium -10°C serait surévaluée à 274 MPa si on la compare aux valeurs de l'ordre du MPa du Tableau 2-2.

2.4.2 Mesure d'adhérence de revêtements de surface

En torsion, une méthode utilisant une caméra haute vitesse a été développée pour mesurer les propriétés des nanorevêtements de céramique recouvrant un tube d'aluminium (Barthelat et al.,

2003). À partir des courbes du couple versus déformation, ils ont évalué les modules d'Young des revêtements et leurs résistances en cisaillement. Après le bris du revêtement, ils observent une perte de rigidité du tube d'aluminium. Par photographie, il est possible de bien observer le décollement du substrat. Malheureusement, on n'a pas étudié ni discuté des facteurs comme les épaisseurs du revêtement, la différence de rigidité des deux matériaux, et le taux de déformation.

Un essai de traction a également été développé afin de mesurer l'adhérence de film de matériau fragile dispersé sur un substrat métallique ductile. Cet essai, *Tensile crack spacing test*, est décrit dans un document produit par le *Programme of Scientific Support to Standardisation de la Belgique* (SSTC, Bruxelle). Il consiste à soumettre une bande métallique recouverte d'un film du revêtement étudié à une traction et à calculer l'adhérence du film à partir de la charge appliquée et du patron de fissures obtenues.

CHAPITRE 3

**LES MÉTHODES DE DÉGLAÇAGE ET LES MATÉRIAUX
ÉLECTROACTIFS**

3. LES MÉTHODES DE DÉGLAÇAGE ET LES MATÉRIAUX ÉLECTROACTIFS

3.1 INTRODUCTION

La première partie de ce chapitre est consacrée à l'inventaire et à la présentation d'une nouvelle classification des différentes méthodes de déglaçage actives et passives disponibles. Les méthodes seront classées selon le type de transfert de l'énergie de déglaçage : directement à la glace ou via le substrat glacé. Cette nouvelle distinction de l'apport énergétique mettra en contexte les travaux de cette thèse où le déglaçage s'effectue par déformation du substrat. La deuxième partie est consacrée à une introduction aux principaux systèmes/matériaux actifs où ils sont décrits et leurs performances comparées. Pour finir, le potentiel des systèmes/matériaux électroactif appliqué au déglaçage est présenté par une brève revue littéraire des cas existants.

3.2 LES MÉTHODES DE DÉGLAÇAGE

Une étude approfondie sur les techniques antigivrantes et dégivrantes a été réalisée en 1994 (révisée en 2002 pour le *Canadian Electricity Association Consortium* par Laflamme, Laforte et Allaire, 2002) afin d'outiller les ingénieurs qui ont à faire face à ce type de problèmes. Sur la base de cette étude, les techniques répertoriées peuvent être classées en trois grandes catégories selon le niveau d'énergie qu'elles requièrent. Les deux premières sont actives et comprennent les méthodes thermiques où la glace est fondu en partie ou totalement et les méthodes mécaniques brisant la glace. La troisième catégorie englobe les méthodes passives utilisant l'énergie et les forces naturelles tels la gravité, le vent, la radiation solaire ou la tension de

surface. Elles comprennent entre autres les revêtements de surface solides à faible adhérence à la glace et les dispositifs favorisant le délestage.

Les méthodes actives et passives sont résumées au **Tableau 3-1** dans lequel elles sont classées selon le type de transfert d'énergie c'est-à-dire directement de la source d'énergie à la glace ou via le substrat.

Tableau 3-1 : Sommaire des méthodes de déglaçage

| | | Transfert de l'énergie de déglaçage | |
|-----------|------------------|---|---|
| | | Directement à la glace | Via le substrat |
| ACTIVES* | Thermiques | <ul style="list-style-type: none"> Liquides abaissant le point de fusion Radiations infrarouges Micro-ondes Lasers Jets de fluide chaud | <ul style="list-style-type: none"> Par effet Joule Recouvrement de fils chauffants |
| | Mécaniques | <ul style="list-style-type: none"> Bâton Rouleaux Couteaux Racloir Projectiles Jets de particules abrasives Robots automatiques Ondes de choc | <ul style="list-style-type: none"> Alliage AMF Torsion Gaines pneumatiques Électro-expulsion Systèmes vibratoires Dispositif explosif |
| | Électrochimiques | | <ul style="list-style-type: none"> Dispositif électrolytant |
| PASSIVES† | Thermiques | | <ul style="list-style-type: none"> Gaine absorbant les rayons incidents |
| | Mécaniques | | <ul style="list-style-type: none"> Anneaux Masse antigiratoire Système éolien Revêtement friable ou graisseux |
| | Chimiques | | <ul style="list-style-type: none"> Revêtements hydrophobes Enduit abaissant le point de fusion de la glace Revêtements chimiques actifs |

* Apport énergétique extérieur lors de l'opération du système déglaçant.

† Aucun apport énergétique extérieur lors de l'opération du système déglaçant.

3.2.1 Les méthodes actives

Parmi les méthodes thermiques actives consistant à chauffer directement la glace, on compte le liquide abaissant le point de fusion de la glace, la radiation infrarouge et les micro-ondes, les jets d'air ou d'un liquide chaud. Par exemple, les liquides dégivrants et antigivre sont couramment utilisés sur les avions en attente de décollage dans les aéroports.

Les méthodes où la glace est chauffée via le substrat englobent celles où c'est l'élément à dégeler qui augmente en température afin de faire fondre la glace accrétée sur celui-ci. En effet, il existe des méthodes utilisant la chaleur provenant du conducteur dans lequel des courants CA ou CC élevés sont appliqués ou utilisant la chaleur d'un recouvrement de fils ferromagnétiques dans lequel un courant induit en CA est appliqué. Dans ce même groupe, il existe une méthode utilisant des gaz chauds pour le déglaçage en vol des bords d'attaque des ailes d'avion. Lorsque les surfaces à dégeler ne sont pas très grandes, on peut les recouvrir d'une gaine chauffante comme c'est le cas pour la vitre arrière d'une automobile.

De façon générale, ces méthodes thermiques sont les plus efficaces. Toutefois, pour certaines applications à plus grandes échelles comme le cas des conducteurs électriques, elles sont très énergivores. Effectivement, il faut disposer d'une puissance électrique suffisante capable de soutenir les courants élevés nécessaires au déglaçage.

Les méthodes mécaniques sont généralement les premières à être utilisées pour dégeler une surface. Elles consistent à frapper directement les dépôts de glace à l'aide d'outils divers tels

racloirs, bâtons, rouleaux, couteaux. Parfois, ces derniers sont opérés à distance au moyen de perche ou montés sur des robots commandés à distance. Elles comprennent également les méthodes un peu moins courantes où le choc mécanique est transmis vis le substrat. Différentes techniques ont été étudiées : un système vibratoire à mi-portée s'alimentant à même le courant de la ligne (N. D., Mulherin et al, 1988), une enveloppe pneumatique gonflable (C. A., Martin et al, 1992), un recouvrement de fils électro-expulsifs (J.L., Laforte et al, 2001) ou d'alliage à mémoire de forme (J., Gerardi et R., Ingram, 1995) et un dispositif de torsion (P., Desmeules, 1992). Pour finir, il existe une méthode active électrochimique développée par Petrenko (V. F., Petrenko, 1994) provoquant l'électrolyse du film d'eau et un dégagement simultané d'hydrogène H_2 et d'oxygène O_2 à l'interface facilitant le délestage.

3.2.2 Les méthodes passives

Les méthodes passives agissent toutes sur la glace via le substrat et se divisent en trois catégories soit : thermique, chimique et mécanique. Les revêtements solides hydrophobes, possédant peu d'affinité chimique avec l'eau et par le fait même diminuant la qualité du mouillage de leur surface s'avèrent efficaces contre l'accumulation de neige mouillée mais produisent un effet mitigé contre l'accumulation et l'adhérence de la glace. Effectivement, un revêtement solide de faible rugosité ou friable peut réduire l'adhérence de la glace (C., Laforte et J-L., Laforte, 2002) mais pas suffisamment pour être qualifié de glaciophobe. Pour leur part, les produits absorbant les radiations ne sont pas efficaces la nuit ou lorsque les radiations sont trop faibles.

Les produits liquides antigivrants présentement utilisés en aéronautique sont solubles dans l'eau et possèdent un point de fusion en dessous de celui de la glace. Leur solubilité avec l'eau dont l'apport augmente lors de précipitations finit par annuler l'effet antigivrant. Les produits visqueux ne réagissent aucunement avec l'eau et la glace. Cependant, même s'ils ne réagissent pas chimiquement, l'impact mécanique des gouttelettes d'eau ou de particules de glace exerce une action mécanique qui va détruire le film protecteur.

Les dispositifs mécaniques favorisant le délestage comprennent les anneaux, efficaces avec la neige mouillée; les masses antigiratoires, réduisant la quantité de glace accumulée et les systèmes éoliens convertissant l'énergie du vent en vibrations mécaniques. Ces dispositifs sont généralement moins coûteux mais ils sont des palliatifs au givrage.

3.3 LES PRINCIPAUX SYSTÈMES/MATÉRIAUX ACTIFS

Cette section présente les principaux système/matériaux actifs ou électroactifs répertoriés dans la littérature (V., White, 2005; Y., Bar-Cohen, 2002; Y., Bar-Cohen, 2001; Y., Bar-Cohen, 1999). La thèse n'ayant pas comme sujet principal l'étude de ces matériaux on se limitera ici à donner au lecteur une vue d'ensemble du domaine des matériaux intelligents. Ces derniers peuvent être regroupés en fonction des mécanismes de fonctionnement en jeu : pneumatique, ionique, électrique et thermique. Ils sont présentés au **Tableau 3-2** avec des exemples illustrant chaque catégorie.

Tableau 3-2 : Les principales catégories des systèmes/matériaux actifs

| Section | Types de matériaux | Stimuli |
|---------|---|---|
| 3.3.1 | <ul style="list-style-type: none"> Membrane gonflable | Air comprimé |
| 3.3.2 | <ul style="list-style-type: none"> Gels ioniques Composite polymère-métal à échange ionique (CPMI). Polymères conducteurs Nanotubes de carbones | Électrique par un mouvement ionique |
| 3.3.3 | <ul style="list-style-type: none"> Élastomères diélectriques Polymères electrostrictifs Polymères cristallins ou céramiques piézoélectriques | Électrique par le mouvement des dipôles ou attraction électrostatique |
| 3.3.4 | <ul style="list-style-type: none"> Alliages à mémoire de forme | Thermique |

3.3.1 Pneumatique : Système McKibben

Le système McKibben est un système convertissant l'énergie pneumatique ou hydraulique d'un fluide en énergie mécanique. Il a été développé dans l'optique de la biorobotique cette discipline qui tente de reproduire les propriétés du corps humain. Ce système, activé par un gaz comprimé, permet de recréer un muscle humain ou animal. Le système a été développé vers les années 1950 par J.L. McKibben pour les patients atteints de polio (G.K., Klute et al, 1999) et est maintenant commercialisé par *Bridgestone Rubber Company* (Japon) pour des applications en robotique.

Ce système consiste en un tube gonflable recouvert d'une gaine métallique tressée qui se contracte sur le sens de la longueur par augmentation de la pression interne (Figure 3-1).

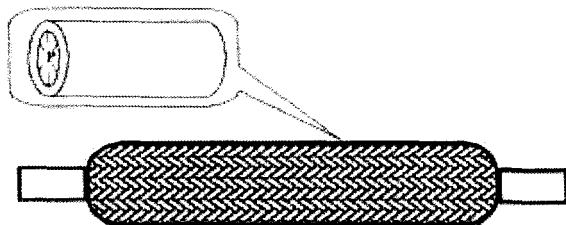


Figure 3-1 : Schéma d'un système McKibben (Klute et al., 1999)

La force ainsi créée par la contraction en longueur du muscle pneumatique est principalement fonction de sa longueur, la pression et la vitesse (C.P., Chou et B., Hannaford, 1994). Dans la littérature, le système est principalement développé pour reproduire un muscle humain. Cependant, dans cette thèse, ce système sera évalué en fonction de la déformation créée en surface. Ce système sera commenté à la suite des résultats expérimentaux obtenus et présentés à la section 6.9.1.

3.3.2 Systèmes ioniques

Le mécanisme d'activation des systèmes ioniques est basé principalement sur le mouvement des ions sortant ou entrant du réseau atomique, lorsqu'ils sont soumis à un stimulus électrique et/ou qu'ils sont plongés dans une solution électrolytique. Pour déclencher l'entrée ou la sortie des ions, il faut concevoir un dispositif composé principalement d'électrodes et/ou de fluides activateurs bien adaptés au matériau électroactif utilisé ainsi qu'à la réponse recherchée.

Selon l'état actuel des connaissances, il est possible de les regrouper en quatre (4) principales sous-classes. Ces catégories tiennent compte à la fois des propriétés des différents matériaux électroactifs utilisés ainsi que du type d'arrangement. Il y a donc:

1. les systèmes à base de **gels**,
2. les systèmes qui fonctionnent avec des **polymères ioniques** dont l'actionneur le plus populaire est un composite polymère-métal à échange ionique (abréviation française CPMI et abréviation anglaise IPMC),
3. les systèmes à base de **polymères conducteurs**,
4. les systèmes à base de **nanotubes de carbones**

3.3.2.1 Les polymères actifs gels

Les *polymères gels* sont des polymères humides et mous capables de subir de grandes déformations pouvant atteindre jusqu'à 1000 fois leur volume initial. On retrouve ces gels principalement sous deux formes. La première forme est une fibre longue et mince qui se contracte sous l'influence d'un stimulus en formant une spirale compacte. La seconde, celle de la **Figure 3-2**, est un réseau réticulé du polymère qui subit un changement de volume (I.M., Khan et J.S., Harisson, 1999).

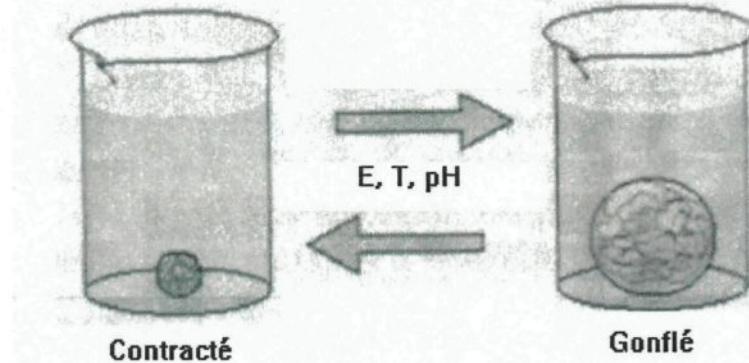


Figure 3-2 : Activation d'un gel réticulé (S.G., Wax et R.R., Sands, 1999)

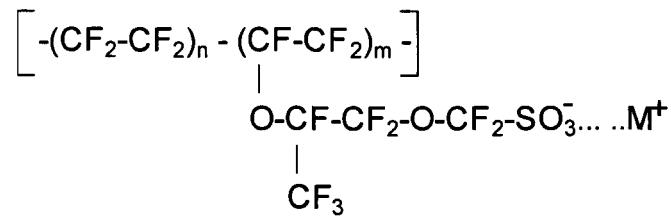
Pour pouvoir être utilisés comme actionneurs, tous les polymères gels doivent être immergés dans une solution aqueuse. Ces gels, sous l'influence du stimulus, échangent des éléments chimiques avec la solution qui les entoure et altèrent ainsi leur état moléculaire. Le système d'actionneur gel transforme ainsi l'énergie chimique libre directement en travail mécanique. C'est le seul système artificiel capable de faire cette conversion directement.

Les polymères gels les plus courants sont activés par des changements en pH et pour cette raison sont nommés : polymères pH actifs. Ils peuvent également réagir à des stimuli thermiques et électriques. Un système électrique comprend deux électrodes plongées dans la solution contenant le polymère gel. Les ions positifs de la solution se déplacent de l'électrode positive vers l'électrode négative et viennent s'unir aux molécules de gel chargées négativement sur la surface faisant face à l'électrode positive. C'est une réaction d'assemblage moléculaire électrocinétique. Ce processus produit la flexion du polymère gel. Les polymères gels sous forme de réseaux réticulés se dilatent quand ils reçoivent des ions de la solution et se

contractent quand les ions quittent le polymère pour passer dans la solution. La magnitude du changement de volume est directement proportionnelle à la densité de réticulation du gel. Comme le mécanisme d'activation des polymères gels est basé sur la diffusion des ions, leur vitesse de réaction est limitée par la vitesse de transport des ions (M., Doi et al., 1992) et (J., Ricka et T., Tanaka, 1984).

3.3.2.2 Les composites polymère-métal ioniques actifs (CPMI)

L'actionneur le plus populaire pour les polymères ioniques est appelé *actionneur composite de polymère-métal à échange ionique* (CPMI). Il est lui-même constitué d'un polymère ionique. Le polymère le plus utilisé pour ce genre d'application est le Nafion © (Dupont, Co.). Pour construire l'actionneur, on recouvre chaque côté du film de Nafion d'un métal noble, comme le platine. Le résultat est appelé membrane de polymère perfluoré d'échange ionique (MEI) (M., Shahinpoor et al., 1999; T.A.E., Loss et al., 1998; T., Okada et al., 1998)



où $m \approx 1$,
 $5 > n < 11$,
 M^+ : contre-ion H^+ , Li^+ ou Na^+

Figure 3-3: Structure moléculaire typique d'un polymère ionique

Le Nafion est un polymère qui conduit les ions. Sa structure est représentée à la Figure 3-3.

Pour obtenir à partir d'un film de Nafion une membrane de polymère perfluoré d'échange

ionique, on lui joint de chaque côté une membrane métallisée formée par exemple de Pt qui servira d'électrode pour les obtenir en forme de dendrites (Figure 3-4) qui s'agrippent à la structure moléculaire du film de Nafion. Cette métallisation du film de Nafion se réalise en deux étapes. En premier lieu, on effectue une métallisation moléculaire complète où les ions métalliques Pt sont dispersés partout dans les régions hydrophiles du polymère. En second lieu, on effectue un platinage ou électrodéposition sur la surface qui permet la formation des dendrites.

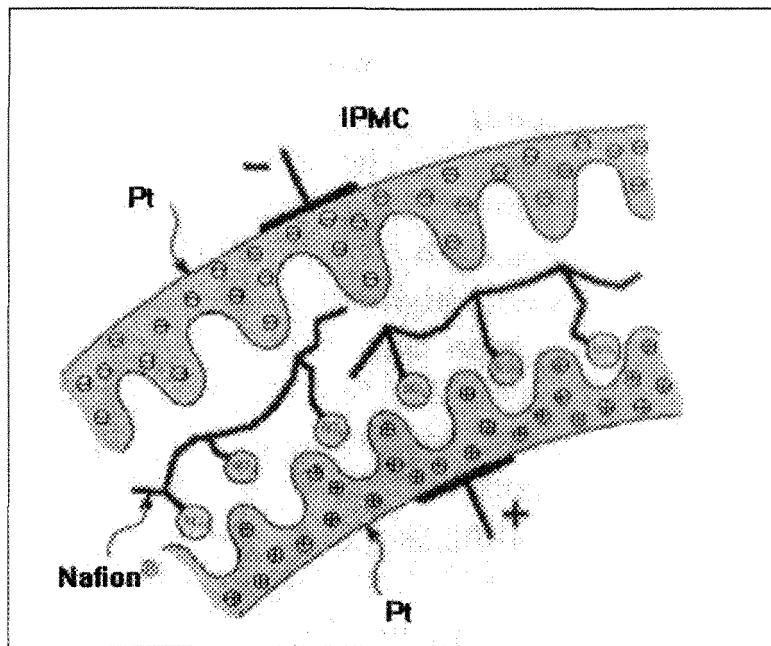


Figure 3-4: Microstructure d'un actionneur CPMI (S.G., Wax et R.R., Sands, 1999)

Le mécanisme d'activation CPMI est basé également sur le transport des ions. Le Nafion contient des groupes ionisants fixes (SO_3^-) dans sa chaîne principale qui ont la propriété de se dissocier et qui peuvent atteindre une charge nette dans une variété de solvants. Ces groupes sont appelés polyions et ils peuvent produire un champ électrique de grande intensité

($\sim 10^{10}$ V/m). Pour que cette dissociation se produise, la membrane doit baigner dans un liquide qui contient des ions mobiles, par exemple des ions Li^+ . En appliquant un champ électrique sur la membrane CPMI, les ions fixes (SO_3^-) et les ions mobiles (Li^+) se déplacent de leur position naturelle vers l'électrode de charge opposée (Figure 3-5). Le déplacement des ions produit une dilatation du côté de la surface face à l'électrode négative et une contraction du côté de l'électrode positive. La déformation du matériau qui en résulte est due à la fois à la migration des ions dans la structure de la membrane et aux interactions qui se créent entre le champ externe et le propre champ interne produit par la structure.

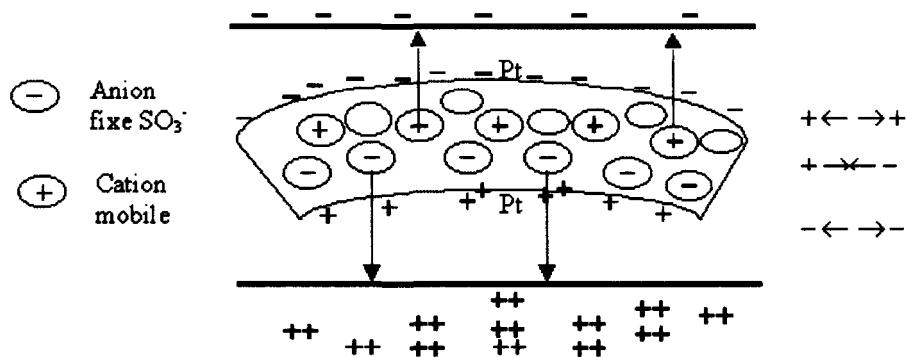


Figure 3-5: Mécanisme de déformation des membranes CPMI.

Le mécanisme d'activation des membranes CPMI est réversible et les voltages de travail sont peu élevés (1-5 V). En principe, ces membranes peuvent travailler à des températures allant jusqu'à -140°C de même que sous vide. Toutefois, la force d'activation qu'elles produisent est encore faible et il faut maintenir la membrane humide ou scellée pour que sa capacité d'activation ne diminue pas.

3.3.2.3 Les polymères conducteurs actifs

Les polymères conducteurs sont semblables aux gels, car leur changement dimensionnel est produit par le mouvement des ions à l'intérieur ou à l'extérieur de leur réseau. Comme dans les systèmes déjà décrits, les polymères conducteurs exigent une anode, une cathode et un électrolyte. L'avantage dans le cas des polymères conducteurs est que les électrodes peuvent être fabriquées indépendamment du matériau conducteur et l'électrolyte liquide peut être substitué par un électrolyte solide.

Le polypyrrole, le polythiophène et les fibres de polyaniline (PANI) sont trois exemples de ce type de polymères. Ils peuvent subir des oxydations et des réductions électrochimiques réversibles et continues dans un milieu électrolyte liquide ou solide. Un stimulus électrique dans ces conditions produit des changements structurels dans leur chaîne de polymère ainsi que l'ouverture ou la fermeture de leurs enchevêtrements, ce qui permet l'entrée ou la sortie des ions et produit alors un changement de leur conductivité, leur couleur et surtout leur volume (T.F., Otero et J.M., Sansinena, 1997 et 1995; D., De Rossi et A., Mazzoldi, 1999).

En utilisant ce principe de fonctionnement, plusieurs chercheurs ont créé différents systèmes d'activation. Un exemple, est celui du type triple couche (*Trilayers Device*) qui est formé d'une membrane d'un polymère électrolyte solide entouré de deux couches d'un polymère conducteur arrangé comme montré à la **Figure 3-6**. L'actionneur peut être fait à base de polypyrrole et de LiClO_4 . L'application d'un courant produit un mouvement angulaire de la membrane triple-couche dans un sens ou dans l'autre selon que le courant appliqué est

anodique ou cathodique (Figure 3-7). Le flux de courant entre les films de polypyrrole est supporté par les mouvements ioniques à l'intérieur du polymère électrolyte solide.

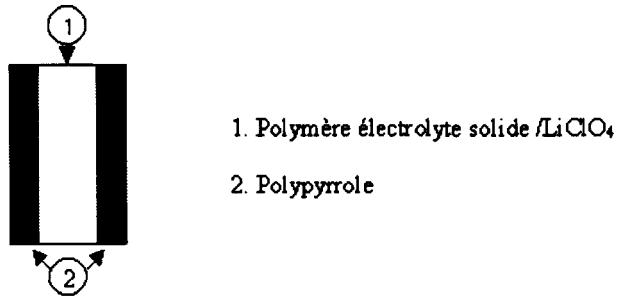


Figure 3-6: Film actionneur triple couche (polypyrrole-polymère électrolyte solide/LiClO₄-polypyrrole).

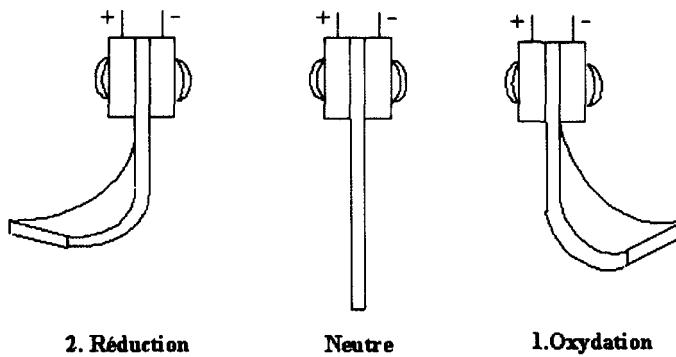


Figure 3-7: Mouvement angulaire de la membrane triple-couche pendant l'application d'un courant électrique.

La déformation de la membrane triple-couche est réversible et peut être produite de façon répétitive. L'application d'un courant anodique (1. Oxydation) fait que la chaîne principale perd des électrons en produisant des charges positives. Alors, pour maintenir l'électroneutralité du système, les anions entrent dans les enchevêtrements du polymère par des canaux qui s'ouvrent, et le volume de la membrane augmente du côté cathodique. Si le processus est inversé, c'est-à-dire si le courant devient cathodique (2. Réduction), les électrons sont expulsés

du polymère et les charges positives sont neutralisées. Alors les anions sortent, les canaux se ferment et le volume du côté cathodique diminue. Le flux de courant à travers le film provoque ainsi le mouvement angulaire de la partie libre de la triple-couche.

3.3.2.4 Les nanotubes de carbone actifs

Les systèmes matériaux/actif utilisant les nanotubes de carbone sont parmi les plus récents développés. Il existe différents mécanismes d'activation pour ces systèmes mais le plus prometteur* serait celui de l'injection de charge dans une double couche de nanotubes de carbone simple (*Single-wall nanotubes*, SWNTs) via des électrodes et un électrolyte. Présentement, de tels systèmes sont surtout étudiés afin de produire des applications à très petite échelle appelés microélectromécaniques (*Micro-electro-mechanical devices, MEMs*) ou même nanoélectromécaniques (*Nano-electro-mechanic, NEMs*).

* Selon Spinks, Wallace, Baughman et Dai, auteurs du chapitre sur les systèmes d'activation à base de nanotubes de carbone du Livre : *Electroactive Polymer Actuators as Artificial Muscles*, Bar-Cohen, 2001

Cependant, l'avancement de la recherche sur les modes d'assemblage des tubes (feuilles ou fibres) pourrait rendre leur application à l'échelle macroscopique possible.

Les systèmes ioniques ont un mécanisme d'activation basé sur la diffusion des ions. Donc, la vitesse de réaction des systèmes est limitée par la vitesse de transport des ions. Or, à froide température, comme lors d'un déglaçage, les ions voyagent plus difficilement. Ainsi, la vitesse d'activation est diminuée, rendant plus difficile l'utilisation de ces types de système au déglaçage.

3.3.3 Systèmes électriques

3.3.3.1 Terminologie

Avant de commencer cette sous-section, il est important de faire la distinction entre les systèmes électriques et ceux déjà présentés. Tout d'abord, le terme électrique a été choisi pour désigner les mécanismes où participent directement sans transport d'ions, les charges électriques soit des dipôles ou des électrodes. On distingue quatre classes de matériaux actifs soit : les polymères diélectriques, les polymères électrostrictifs, les polymères piézoélectriques et les céramiques piézoélectriques.

3.3.3.2 Les élastomères diélectriques actifs

Un polymère diélectrique qui est intrinsèquement un isolant est actif lorsque soumis à un champ électrique. Il se déforme alors à volume constant, c'est-à-dire aminci tout en augmentant sa surface (**Figure 3-8**) (M., Benslimane et P., Gravesen, 2002). Un tel système est formé en plaçant une couche d'élastomère diélectrique en sandwich entre deux électrodes. En

présence d'un champ électrique appliqué, l'élastomère se déforme due à l'effet Maxwell créant une force électrostatique (P., Sommer-Larsen et al., 2002). La pression p (Pa) ainsi produite est :

$$p = \epsilon \epsilon_0 E^2 = \epsilon \epsilon_0 (V/e)^2 \quad \text{Équation 3-1}$$

où : ϵ = cte diélectrique du matériau

ϵ_0 = permittivité du vide ($8,854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$)

E = champ électrique imposé (N/C)

V = voltage appliqué (V)

e = épaisseur du polymère (m)

Plusieurs élastomères diélectriques ont fait l'objet d'études pour utilisation comme matériel actif dans les systèmes électriques comme l'acrylate adhésine VHB^{MC} 4910 de 3M^{MC}, le silicium Sylgard® de Dow Corning et l'Élastosil® de Wacker (Y., Bar-Cohen, 1999).

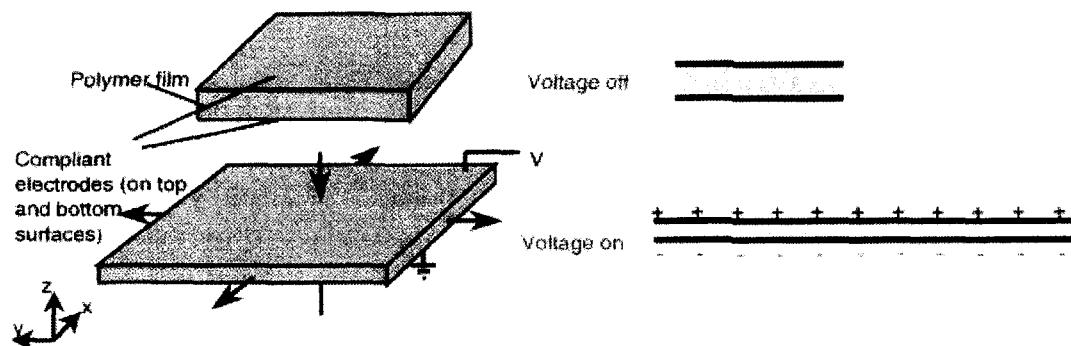


Figure 3-8 : Système actif d'élastomère diélectrique (R., Peltre et al., 2002)

3.3.3.3 Les polymères électrostrictifs actifs

Comme les polymères diélectriques, les polymères électrostrictifs ont la capacité de se déformer en s'aplatissant dans le sens de leur épaisseur et s'étendant dans le sens de leur surface. Ce sont, de fait, des polymères diélectriques, polaires ou ferroélectriques* présentant un module d'Young, E , généralement inférieur à 1 MPa. Un actionneur électrostrictif est constitué d'un film de polymère électrostrictif et de deux électrodes flexibles. Lorsqu'une tension électrique est appliquée à un tel actionneur, les charges positives se retrouvent sur une électrode et les charges négatives sur l'autre. Comme ces charges opposées s'attirent, le film dans le sens de l'épaisseur est comprimé. La compression du film de polymère est due d'une part à la force électrostatique qui se développe entre les électrodes (Maxwell) et dans l'autre part à l'attraction des dipôles à l'intérieur du polymère. La littérature ne fait pas toujours la distinction entre l'électrostriction et l'effet Maxwell. Un des copolymères dont le comportement électrostrictif a souvent été étudié est le poly (vinyldène fluororide-trifluoroéthylène) irradié d'électrons (P(VDF-TrFe)) (Z-Y., Chen et al, 2002; Xu et HEAL, 2001; S.J., Gross et al., 1999).

Les systèmes diélectriques et électrostrictifs actifs, produisant les plus grandes déformations pour un voltage donné, sont malheureusement ceux dont la membrane est la plus mince. Leur utilisation à grande échelle pour dégeler est donc difficilement envisageable.

* Polarisation spontanée sous l'action d'un champ électrique

3.3.3.4 Polymères cristallins ou céramiques piézoélectriques actifs

La piézoélectricité est la capacité de certains cristaux et polymères cristallins comme le quartz, les titanates de zirconium de plomb et les polyimides (Ounaies, 1999) de générer une tension électrique par polarisation proportionnelle aux contraintes mécaniques appliquées. Dans les systèmes matériaux/actifs, c'est la piézoélectricité inverse qui est exploitée, c'est-à-dire que le cristal se déforme lorsqu'il est soumis à un champ électrique. Les principales applications des systèmes piézoélectriques sont présentement les dispositifs antivibratoires, les systèmes de micropositionnement, les micromoteurs, et les valves de contrôles (H., Borgmann, 2004)

3.3.4 Alliages à mémoire de forme AMF

Les alliages à mémoire de forme (AMF) sont des alliages qui changent de forme lorsqu'ils sont chauffés à une température donnée plus basse que le point de fusion et, lors du refroidissement, vont reprendre leur forme initiale. Cet effet mémoire est dû à la présence d'une phase métastable provoquée par une transformation martensitique réversible de certains alliages dont les plus courants sont : Cu-Zn-Al, Cu-Zn-Be, Au-Cd et le Ni-Ti (V., Brailovski et al. 2003). Ces alliages sont déjà utilisés comme système d'activation dans plusieurs domaines:

astronautique : structures qui se déploient par elle-même dans l'espace après leur lancement

industriel : valves de contrôle, sonde et moteurs

médical : *Stent*^{*}, agrafes chirurgicales

* Le tube en AMF est inséré contracté (à sa plus petite taille) dans l'artère bouchée et est chauffé afin de le dilater et par le fait même dilater l'artère.

3.3.5 Performance des systèmes/matériaux actifs

Le **Tableau 3-3** liste les principaux systèmes/matériaux décrits dans les sections précédentes en y mentionnant les déformations attendues, le niveau de contraintes atteint ainsi que la tension nécessaire à l'activateur.

Le système/matériaux produisant la plus grande déformation est celui composé de gel avec des déformations pouvant atteindre 1000 %. Cependant, la contrainte qu'il génère reste la plus faible valant entre 0,001 et 0,01 MPa et les systèmes aqueux doivent être enveloppés de façon hermétique rendant leur application au déglaçage difficile. Le type de système produisant les plus grandes contraintes sont ceux utilisant des AMF avec environ 700 MPa. Mais, après plusieurs retours à l'état initial, le système se dégrade. Les gels, les CPMI, les polymères conducteurs et les nanotubes de carbone nécessitent les tensions électriques les plus faibles valant entre 1 à 10 V. Toutefois, les polymères diélectriques, électrostrictifs et les piézoélectriques fonctionnent à une tension électrique de l'ordre du kV.

Tableau 3-3 : Principales propriétés actives des systèmes / matériaux actifs

| Types | Propriétés | | Commentaires |
|---|-------------------------|----------------|--|
| McKibben* | Déformation | Non déterminée | |
| | Contrainte (à 5 bar) | 1,4 – 0,88 MPa | |
| | Pression opérationnelle | variable | |
| Gels† | Déformation | Jusqu'à 1000 % | Doivent être enveloppés hermétiquement |
| | Contrainte | 0,001-0,1 MPa | |
| | Voltage opérationnel | 1-5 V | |
| CPMI * | Déformation | >10% | Doivent être enveloppés hermétiquement Performance diminuée par une baisse de température |
| | Contrainte | 0,1-3 MPa | |
| | Voltage opérationnel | <10V | |
| Polymères Conducteurs † | Déformation | ~2% | Doivent être enveloppés hermétiquement Performances améliorées à petite échelle |
| | Contrainte | <34 MPa | |
| | Voltage opérationnel | <10 V | |
| Nanotubes de carbone† | Déformation | ~0,2% | À petite échelle (μm) mais en développement pour l'utilisation à plus grande échelle (mm) |
| | Contrainte | >10 MPa | |
| | Voltage opérationnel | <10 V | |
| Polymères diélectriques et électrostrictifs † | Déformation | 20-380% | Performances améliorées à petite échelle |
| | Contrainte | ~1 MPa | |
| | Voltage opérationnel | >1 kV | |
| Piézoélectriques | Déformation | <1,7% | |
| | Contrainte | 10^2 MPa | |
| | Voltage opérationnel | ~1 kV | |
| AMF* | Déformation | <8% | |
| | Contrainte | ~700 MPa | |
| | Voltage opérationnel | Non applicable | |

* Chou et Hannaford, 1994

† Bar-Cohen, 2001

3.4 LES ÉLECTROACTIFS APPLIQUÉS AU DÉGLAÇAGE : LEUR POTENTIEL ET LEURS LIMITES

3.4.1 Pneumatique

Initialement développée par l'industrie aéronautique, cette technique consiste à gonfler une gaine extensible par injection rapide d'un gaz créant ainsi une impulsion mécanique capable de briser la glace. Cette technique est utilisée et opérationnelle par exemple pour dégeler les bords d'attaque d'ailes d'avion et des entrées d'air des moteurs d'avion. Cependant, le déglaçage obtenu peut être partiel (il reste des morceaux de glace collés à la surface) et l'installation du système est complexe dû à l'apport de gaz pressurisé nécessaire. L'efficacité du système diminue au fur et à mesure que le matériel de la gaine gonflable se détériore.

3.4.2 Piézoélectrique

Il existe des brevets d'invention décrivant des techniques de déglaçage utilisant un matériau piézoélectrique comme principale composante des systèmes d'activation. Broussoux et ses collègues de Thomson-CSF en France proposent un tel système pour enlever la glace formée sur des surfaces verticales comme celles des antennes ou celles des systèmes optiques (D., Broussoux et al., 1992). Également, Finke et Bank (R.C., Finke et B.A., Banks, 1985) ont breveté un système déglaçant utilisant un mécanisme constitué de plusieurs couches de céramique piézoélectrique reliées entre elles. Ce système est proposé pour le déglaçage des bords d'attaque des ailes d'avions en remplacement des gaines gonflables pneumatiques ou des dispositifs acoustiques. Dans les deux cas, l'effet électromécanique du piézoélectrique est utilisé pour produire une vibration suffisamment puissante pour briser ou enlever la glace. Les brevets décrivent dans les détails comment fabriquer de tels systèmes et donnent les modes

opératoires à préférer selon les conditions de givrage: type, épaisseur du dépôt, la température de l'air, etc. Toutefois, à notre connaissance, aucun des systèmes précédemment mentionnés n'est commercialement disponible actuellement. Également, aucunes données sur l'aspect détérioration des systèmes ne sont présentées.

Au centre de recherche sur l'ingénierie électronique et acoustique de l'université *Pennsylvania State*, M. Ramanathan et ses collègues ont développé un système de déglaçage des pales d'hélicoptères utilisant une activation piézoélectrique (S., Ramanathan et al., 2002). Ils ont utilisé une plaque de *piezo lead zirconate titanate* (PZT-5A ou PZT-8), recouverte d'une électrode d'argent qui a été collée à une plaque d'aluminium de l'épaisseur d'une pale d'hélicoptère. La plaque piézoélectrique est alimentée à une fréquence de 1 MHz soit à sa valeur de fréquence de résonance. Par manque d'installations réfrigérées adéquates, on doit d'abord pulvériser de l'eau sur la plaque à 2°C avant de la refroidir pour obtenir une épaisseur de glace d'environ 1,5 mm. Avec le PZT-8 générant des ondes de cisaillement horizontales, on a fait fondre une couche de glace de 1,5 à 2,5 mm en environ 2 à 5 minutes. Sur la base de ces données, il semble que le déglaçage s'est produit de façon thermique plutôt que mécanique.

À cette même université, au département de l'ingénierie aérospatiale, un étudiant a fait l'étude empirique d'un système de déglaçage utilisant des tubes piézoélectriques applicables aux pales d'hélicoptères. L'étude théorique porte principalement sur les calculs relatifs aux caractéristiques de conception mais demeure au stade conceptuel sur le déglaçage. Aucune donnée expérimentale sur les propriétés adhérentes de la glace n'est donnée.

3.4.3 AMF

Dans l'étude exhaustive sur les méthodes de déglaçage (J.N., Laflamme et al., 2002), on dénombre sept documents dont quatre (4) brevets sur le déglaçage utilisant la déformation créée par des alliages à mémoire de forme. Les auteurs concluent que la faisabilité du concept reste encore à démontrer et que la méthode demeure énergiquement coûteuse en raison du chauffage nécessaire à l'amorce de la transformation martensitique. De plus, le retour à l'état initial du système par un refroidissement peut être long et donc empêcher de pouvoir utiliser le système à plusieurs reprises dans un court laps de temps.

Comme pour les études sur les systèmes piézoélectriques, il y a très peu de données expérimentales indiquant les conditions où se produit le déglaçage. Seul un article de Gerardi, Ingram et Catarella présenté à l'*International Icing Symposium 95* (J.,Gerardi et al.,1995) mentionne, sans plus de précision, que la déformation nécessaire au déglaçage se situe en **0,1 et 0,3 %** et que la contrainte mesurée en cisaillement vaut de 0 à 200 Psi, soit de 0 à 1,4 MPa.

CHAPITRE 4

MONTAGES ET MESURES EXPÉRIMENTALES

4. MONTAGES ET MESURES EXPÉRIMENTALES

4.1 INTRODUCTION

Ce chapitre décrit les montages utilisés pour mesurer l'adhérence ainsi que ceux mis au point dans cette thèse pour caractériser le comportement mécanique de la couche de glace sollicitée via le substrat en traction, torsion et flexion. Le chapitre décrit également les mesures de densité de la glace et de rugosité du substrat. Le chapitre termine avec la présentation sommaire de trois montages utilisés pour évaluer le potentiel déglaçant de trois systèmes/matériaux actifs soit ceux de McKibben, CPMI et piézoélectrique décrit dans le chapitre précédent.

4.2 MESURE DE L'ADHÉRENCE DE LA GLACE

L'appareil utilisé pour mesurer l'adhérence de la glace est une centrifugeuse spécialement adaptée (C., Laforte et A., Beisswenger, 2005). L'échantillon de glace est obtenu en givrant l'extrémité d'une lame d'aluminium recouverte ou non d'un revêtement candidat sous une précipitation de bruine verglaçante sur une surface d'environ 5 cm^2 avec une épaisseur d'environ 6 mm. Cette lame est ensuite équilibrée par pivot statique et insérée dans la centrifugeuse. La force centrifuge provoquée par la rotation fait décoller la couche de glace lorsque la contrainte exercée dans la glace atteint celle de son adhérence.

Le décollement de la glace est capté par des cellules piézo-électriques sensibles aux vibrations collées aux parois de la cuve relayant leurs signaux en temps réel à un ordinateur. Ce signal permet de déterminer le moment précis du décollement ainsi que la vitesse de rotation à cet

instant. Finalement, la contrainte d'adhérence est calculée à partir de la vitesse de rotation au décollement, la masse de glace et la position de l'échantillon de glace sur la lame. Selon les équations :

$$F = mr\omega^2$$

Équation 4-1

Où:

F = force (N)

m = masse de glace (Kg)

r = rayon de rotation (m)

ω = vitesse de rotation (rad/s)

À partir de la force, la contrainte d'adhérence, τ est ainsi calculée:

$$\tau = \frac{F}{A}$$

Équation 4-2

Où :

A = surface de l'échantillon de glace (m^2)

F = force à la rupture (N)

Une série d'essais comprend sept échantillons givrés simultanément : trois (3) lames recouvertes du produit candidat et quatre (4) d'aluminium non recouvert. Après le givrage et une période d'attente d'une heure, l'adhérence de la glace sur les lames recouvertes de produits est mesurée et comparée à celle des trois poutres d'aluminium non recouvert. La quatrième lame d'aluminium non recouvert sert à mesurer la densité de la glace.

La **Figure 4-1** montre les principales parties de l'appareil soit l'enceinte principale (*centrifuge vat*) dans laquelle la poutre est insérée. Tous les détails dont le matériel, le protocole, les conditions d'essais et de givrage de cette nouvelle méthode, sont présentés à l'**ANNEXE 1**.



Figure 4-1 : Centrifugeuse utilisée pour la mesure d'adhérence de la glace

4.3 ESSAIS DE DÉGLAÇAGE PAR DÉFORMATION DU SUBSTRAT EN TRACTION

4.3.1 Montage et échantillons

Le montage consiste en une presse de traction conventionnelle de marque *Applied Test System, ATS* placée en chambre climatique en position horizontale de façon à ce que l'échantillon soit directement sous les gicleurs de pluie verglaçante (Figure 4-2). L'échantillon plat est installé dans les attaches où il est étiré d'environ 0,05 % avant le givrage. De cette façon, l'échantillon est parfaitement horizontal et le glaçage se fait de façon uniforme. Un gabarit permettant de glacer seulement la surface de l'échantillon est installé avant le givrage. Après le glaçage, on attend une heure afin que la glace soit bien à la température de la chambre soit -10 °C. L'échantillon est glacé et étiré sans subir aucune manipulation réduisant ainsi les risques de bris accidentel entre les étapes du glaçage et de la mise en traction. L'acquisition des données (charge et déformation) s'effectue avec un ordinateur doté du logiciel *Quick log*. La fréquence de l'acquisition, sélectionnée en fonction de la vitesse de l'essai, est comprise entre 100 et 1000 lectures par seconde. L'essai et l'acquisition des données sont démarrés indépendamment l'un de l'autre.

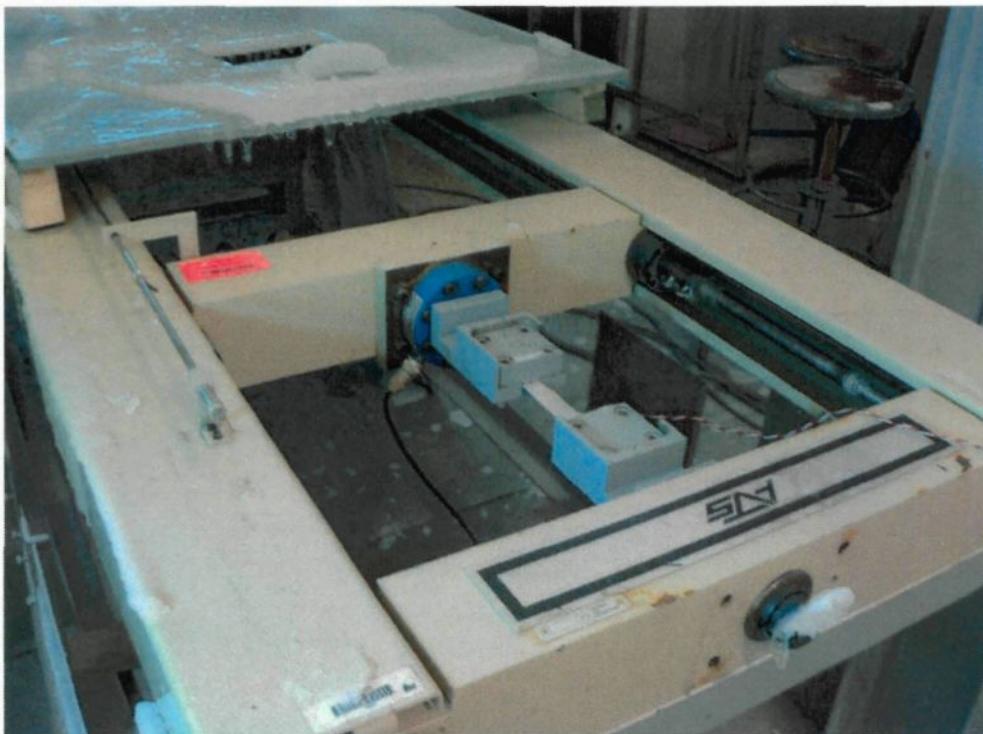


Figure 4-2 : Montage de l'essai de traction givrée

Dans l'essai de traction givrée, la déformation a été mesurée en temps réel à l'aide de la jauge collée au centre de l'échantillon sur la surface non couverte de glace. Pour sa part, la charge appliquée est mesurée, également en temps réel, à l'aide de la cellule de charge de la presse. À partir de ces enregistrements, on obtient les graphiques de contrainte en fonction de la déformation. Le décollement ou la fissuration de la glace provoque un changement de pente dans les enregistrements obtenus. Ce changement est obtenu en raison de la diminution de la rigidité de la lame hétérogène lors du bris et permet de déterminer la déformation du substrat à cet instant. Dans la plupart des cas, une photo de l'échantillon brisé a été prise et dans six (6) cas, l'essai a été filmé à haute vitesse.

Des échantillons de trois matériaux différents soit l'aluminium 2024 T3, l'aluminium 3105 H14 et le nylon, ont été préparés selon la norme ASTM D638-02a (aluminium) et la norme ATSM D882-91 (nylon). Les dimensions des échantillons sont données au **Tableau 4-1** qui fait aussi mention des types de jauge et des produits utilisés pour les coller.

Tableau 4-1 : Échantillons de traction

| Paramètres/Matériaux | Aluminium 2024 T3 | Aluminium 3105 H14 | Nylon |
|-------------------------------|--|--------------------|-------|
| Longueur (± 1 mm) | 154 (1 ^{ière} série) [*] 166 (2 ^{ième} série) [†] | 167 | 164 |
| Largeur ($\pm 0,01$ mm) | 16,26 (1 ^{ière} série) 18,78 (2 ^{ième} série) | 19,10 | 18,60 |
| Épaisseur ($\pm 0,01$ mm) | 0,36 (1 ^{ière} série) 0,42 (2 ^{ième} série) | 0,50 | 1,10 |
| Type de jauge | CEA-13-250UW-350 (Vishay Measurements Group, inc.) | | |
| Colle à jauge | M Bond 200 (Vishay Measurements Group, inc.) | | |
| Revêtement de la jauge | MCOAT A (Vishay Measurements Group, inc.) | | |
| Facteur de jauge | 2,099 [‡] | | |

* 1^{ière} série : 2004 (Caroline Laforte et Émilie Harvey)

† 2^{ième} série : 2005 (Caroline Laforte et Mehran Riahi)

‡ Ajusté pour -10°C

4.3.2 Calculs et modèles utilisés

Pour ces essais, on considère que l'échantillon hétérogène composé du substrat et de la glace se déforme en régime élastique linéaire où la loi de Hooke est applicable. **Les contraintes imposées à l'échantillon n'atteignent pas la limite élastique du substrat.**

Les efforts agissant sur l'échantillon glace/substrat dans l'essai de traction sont présentés à la

Figure 4-3. Ce diagramme de corps libre a été en partie tiré du mémoire de maîtrise de Mehran Matbou Riahi (Riahi Matbou, 2007) portant sur l'étude numérique de l'essai de traction tel que présenté dans cette thèse.

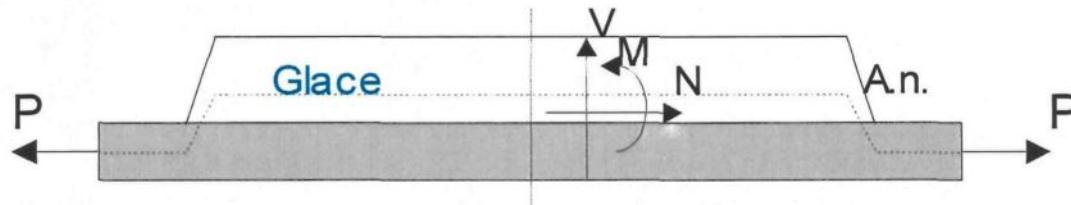


Figure 4-3 : Schéma de chargement : essai de traction

Lorsque la force, P est appliquée sur le substrat, deux réactions se produisent. Premièrement, la contrainte normale provoque l'étirement du substrat et de la glace. Deuxièmement, il y a une légère flexion due à l'excentricité de l'échantillon hétérogène où l'axe neutre ne correspond pas à l'axe de traction. Donc, comme le montre le diagramme de corps libre, l'échantillon est soumis à un moment fléchissant M et à un effort tranchant V . À l'interface dans la glace, il y a une contrainte normale $\sigma_{\text{int. glace}}$, égale à la contrainte due à la traction $\sigma_{T \text{ int. glace}}$ à laquelle s'additionnent une contrainte due à la flexion $\sigma_{F \text{ int. glace}}$ et un cisaillement provoqué par l'effort

tranchant. Ce cisaillement est plus important à chaque bout de l'échantillon où il y a déplacement de l'axe neutre par rapport à l'axe de traction.

Les calculs relatifs à cet essai sont principalement basés sur l'hypothèse que la déformation du substrat à la jauge $\epsilon_{\text{substrat}}$ est égale à la déformation à l'interface qui est la même dans la glace et le substrat. De plus, on néglige la déformation latérale et on suppose que l'échantillon glacé n'est pas endommagé avant l'application de la charge. De cette façon, la contrainte normale de rupture à l'interface dans la glace $\sigma_{\text{rupture int. glace}}$ est évaluée à la mi-longueur de l'échantillon à partir de la déformation de rupture ϵ_{rupt} , mesurée par la jauge au moment du bris, multipliée par le module de rigidité de la glace (Tableau 4-2). La contribution de cisaillement a été considérée négligeable. Cette dernière sera discutée de façon plus détaillée à la section 7.3.4. Enfin, le module de rigidité de l'échantillon hétérogène $E_{\text{hétérogène}}$ est évalué point par point à partir des courbes expérimentales de la contrainte appliquée $\sigma_{\text{appliquée}}$. Ces dernières illustrent clairement la perte de rigidité lors du bris ou le décollement de la glace.

Tableau 4-2 : Équations et modèles applicables à l'essai de traction givré

| Valeurs calculées | Équations | Variables (unités) |
|---|--|---|
| $\sigma_{\text{appliquée}}$ (MPa) | $\sigma_{\text{appliquée}} = \frac{P \cdot g}{b_{\text{substrat}} \cdot e_{\text{substrat}}}$ | P = charge appliquée (kg) $g = 9,82 \text{ m/s}^2$ b_{substrat} = largeur du substrat (m) e_{substrat} = épaisseur du substrat (m) |
| $E_{\text{hétérogène}}$ Module d'Young (MPa) | $E_{\text{hétérogène}} = \frac{\sigma_{\text{appliquée}}}{\varepsilon_{\text{mesurée}}}$ | $\sigma_{\text{appliquée}}$ = (MPa) $\varepsilon_{\text{mesurée}}$ = lecture de la jauge |
| $\sigma_{\text{rupture int. glace}}$ (MPa) | <p>Si :</p> <ol style="list-style-type: none"> $\varepsilon_{\text{glace}} = \varepsilon_{\text{substrat}}$ $\sigma_{\text{axiale}} \gg \sigma_{\text{laterale}}$ Échantillon n'est pas endommagé avant la rupture <p>Alors :</p> $\sigma_{\text{rupt.int.glace}} = \varepsilon_{\text{rupt.}} \cdot E_g$ | $E_g = 9\,900 \text{ MPa}$ $\varepsilon_{\text{rupt.}}$ = déformation à la rupture |

Le protocole expérimental détaillé ainsi qu'un exemple descriptif des fiches d'essais obtenus lors de l'essai de traction givré sont présentés à l'**ANNEXE 1** et l'**ANNEXE 2** respectivement.

4.4 DÉTERMINATION DES CRITÈRES DE DÉGLAÇAGE PAR TORSION

4.4.1 Montage et échantillons

Le montage utilisé consiste principalement en un appareil de torsion conventionnel *Tinius Olsen*, placé en chambre climatique (**Figure 4-4**). Un moteur CC muni d'un contrôleur de révolutions couplé à même les engrenages de l'appareil permet d'en faire varier la vitesse. Cette modification permet d'obtenir une torsion à vitesse constante et ajustable par le biais d'une source variable à courant continu. Le système de fixation des échantillons a également été modifié et adapté à l'échantillon de forme tubulaire. Le tube étant installé givré, aucune torsion ne doit y être imposée avant l'essai pour éviter un déglaçage prématué. À cette fin, un second dispositif d'attache a été ajouté à celui d'origine (**Figure 4-5**). Il consiste en un manchon cylindrique dont le diamètre intérieur correspond au diamètre extérieur du tube échantillon qui y est inséré. Les bouts du tube échantillon ont été percés pour y insérer une goupille métallique traversant également le cylindre d'attache.

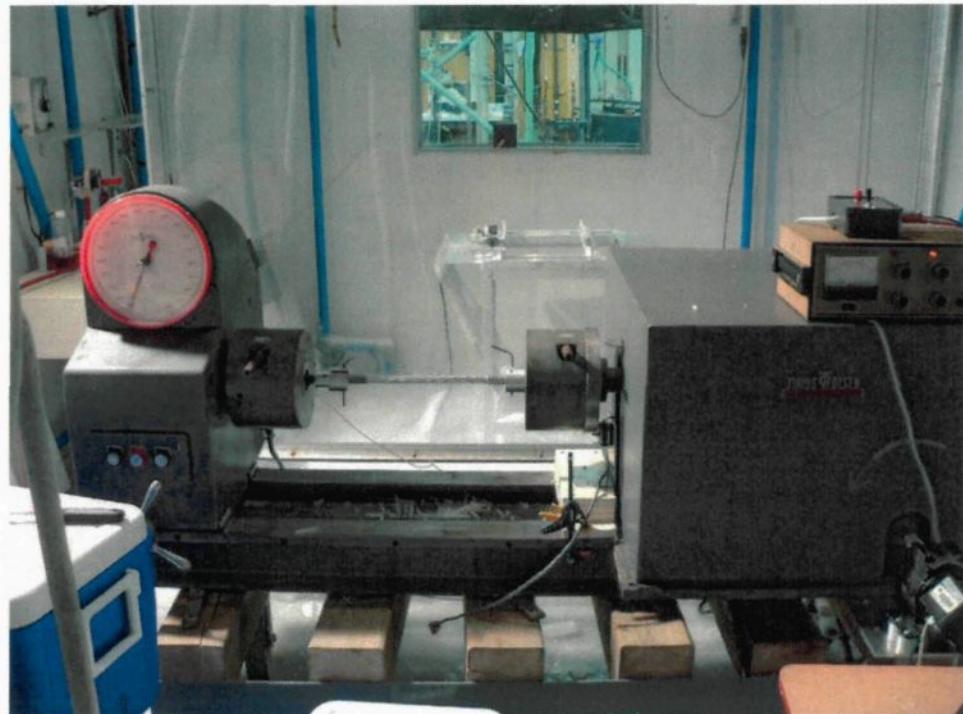


Figure 4-4 : Montage de l'essai de torsion givré

Une rainure a été ajoutée au manchon de fixation permettant la manipulation des fils de la jauge de déformation sortant par le bout de l'échantillon. À cette extrémité, un dynamomètre électronique OMEGA *Socket Extension Reaction Torque Sensor* (0-165 N.m) a été installé entre le système d'attache et le manchon d'origine permettant ainsi la mesure du couple en temps réel par un logiciel de l'ordinateur. Pour le glaçage uniforme des tubes échantillons, un support (Figure 4-6 et Figure 4-7) fait d'aluminium a été construit. Il supporte trois échantillons tournés à vitesse constante à l'aide d'un moteur.

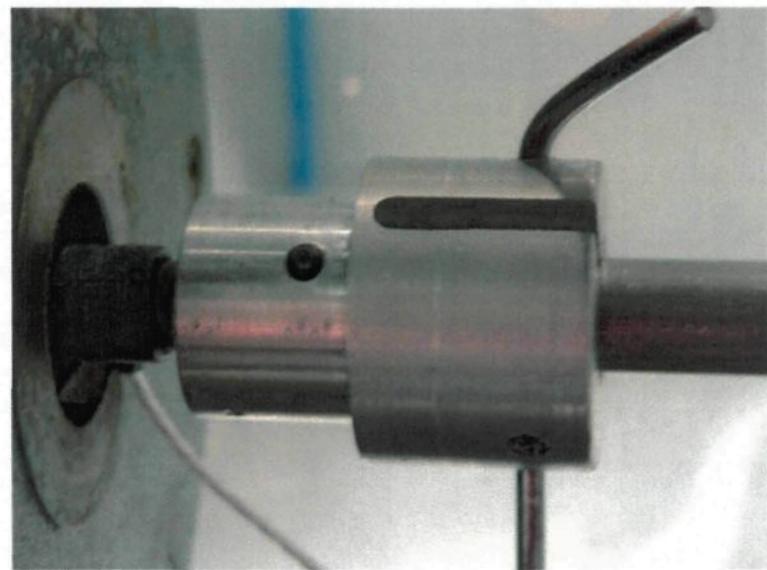


Figure 4-5 : Manchon d'attache de l'échantillon avec goupille de fixation

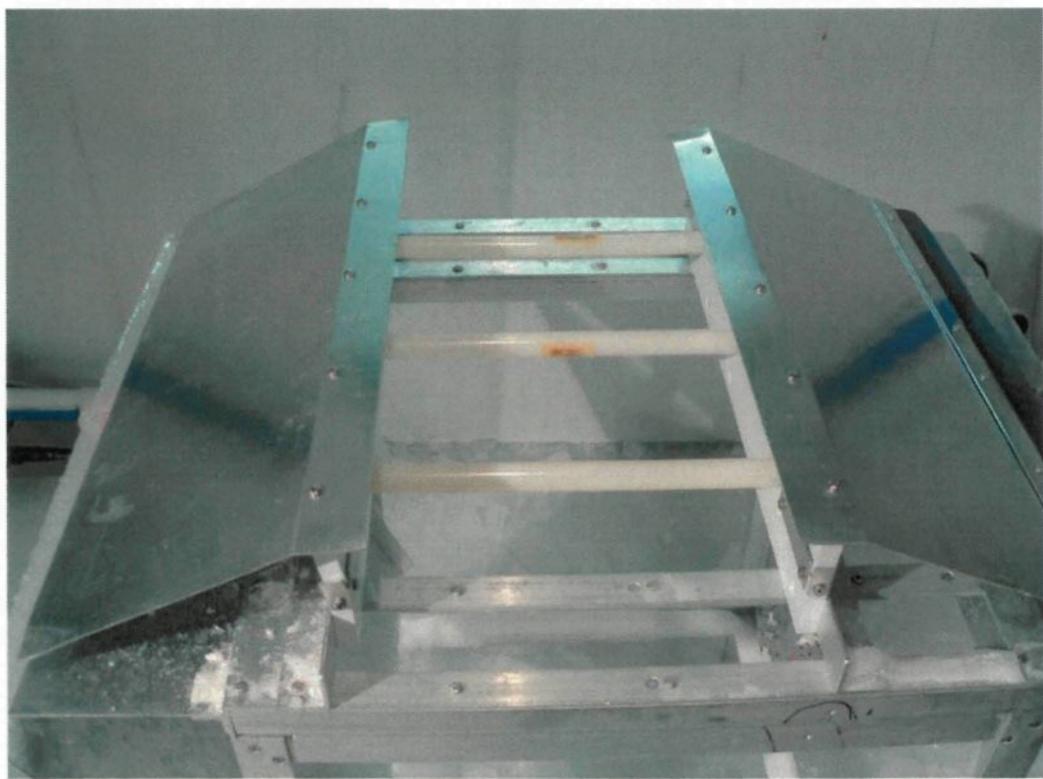


Figure 4-6 : Support de glaçage pour l'essai de torsion

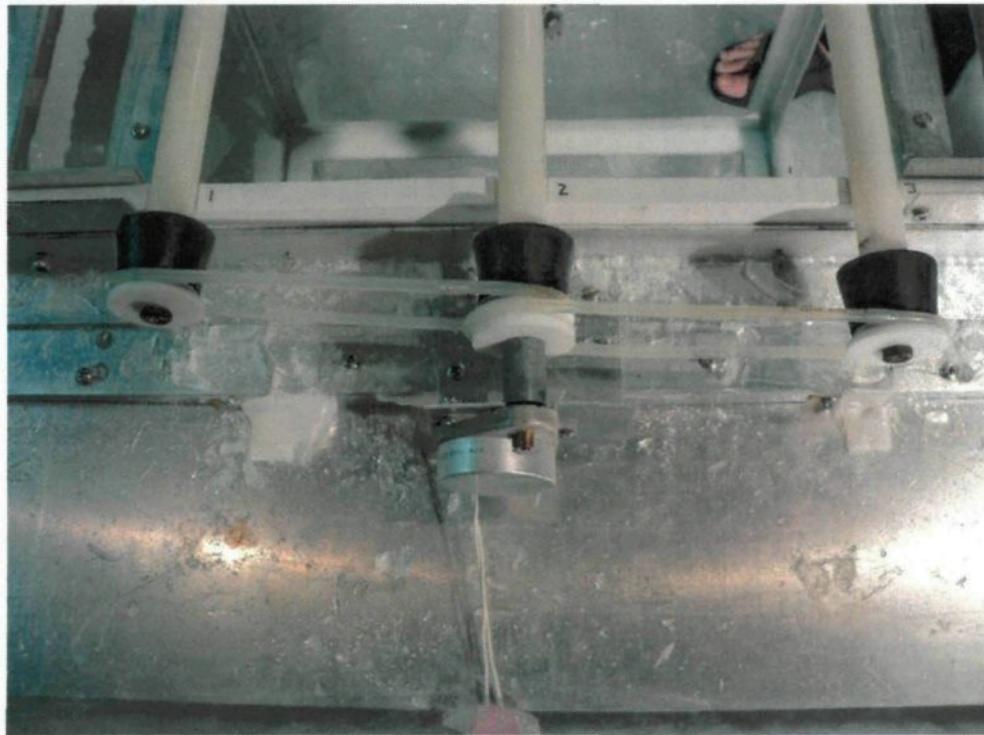


Figure 4-7 : Motorisation de la table de glaçage

Dans l'essai de torsion givré le tube échantillon recouvert d'une couche de glace d'épaisseur uniforme est soumis à un couple croissant. La glace décolle ou fissure lorsque le cisaillement imposé est suffisant à l'interface glace-substrat. La déformation en cisaillement et le couple sont mesurés en temps réel, la première, à l'aide de la jauge de déformation de l'échantillon mesurant directement le cisaillement, et le second, au moyen du dynamomètre électronique.

La jauge de déformation a été collée au centre de l'échantillon sur la surface du tube directement exposée au givrage. Un trou d'environ un millimètre de diamètre a été perforé au voisinage de la jauge de façon à faire passer les fils de connexion dans le tube. De cette façon, le tube échantillon peut-être tourné durant le glaçage sans être encombré par les fils. La

déformation de rupture est déterminée à partir des enregistrements de la déformation et du couple appliqué. Comme pour les essais de traction, le décollement ou la fissuration de la glace provoque dans les enregistrements un changement de pente doux (cas d'un décollement) ou abrupt (cas d'une fissuration) en raison du changement de rigidité de la poutre hétérogène. Ces enregistrements sont complétés par l'examen visuel, des **photographies** de l'échantillon brisé et des **vidéos pris lors de l'essai**. Après chaque essai, les fissures observées dans le dépôt de glace sont dessinées dans un cahier de laboratoire.

Des tubes échantillons de deux matériaux différents soit l'aluminium 2024 T3, l'aluminium 3105 H14 et le nylon, ont été préparés et instrumentés. Les dimensions des échantillons sont données au **Tableau 4-3**.

Tableau 4-3 : Échantillons de torsion

| Paramètres/Matériaux | Aluminium 2024 T3 (sablé 400 Grit) | Nylon |
|--|--|---|
| Rugosité (Ra) μm Selon la méthode décrite à la section 4.6.1 | $0,49 \pm 0,13$ | $0,18 \pm 0,04$ |
| Longueur ($\pm 0,1$ mm) | 310,0 | 310,0 |
| Diamètre extérieur ($\pm 0,01$ mm) | 19,04 | 18,92 |
| Diamètre intérieur ($\pm 0,01$ mm) | 15,69 | 16,00 |
| Type de jauge | Rosette CEA-13-062UV-350 (Vishay Measurements Group, inc.) | |
| Colle à jauge | M Bond 200 (Vishay Measurements Group, inc.) | |
| Facteur de jauge | Mars 2005 au 3 mai 2005: 2,094* 3 mai 2005 au 29 juin 2005: 2,135 | |
| Revêtement de la jauge | <ul style="list-style-type: none"> • MCOAT A • Cire • Ruban adhésif d'aluminium | <ul style="list-style-type: none"> • MCOAT A • Cire |

*Ajusté pour -10°C et 4,9 m de fil

Les jauge doivent être bien protégées contre l'humidité et l'eau, car elles sont collées directement sur la surface du tube exposée à la glace. Pour se faire, une couche de cire a été appliquée sur le revêtement de la jauge. La surface de la jauge (environ 3 cm^2) représente 2 % de la surface totale de l'échantillon déglacé. C'est pourquoi, l'effet de la jauge sur la mesure globale de la déformation au décollement a été considéré non significatif. Toutefois, afin de minimiser cet effet sur les tubes d'aluminium, un ruban adhésif d'aluminium a été collé sur la jauge des échantillons d'aluminium seulement. De cette façon, les deux surfaces sont faites des deux mêmes métaux.

4.4.2 Calculs et modèles utilisés

La **Figure 4-8** illustre le chargement du cylindre lors de la torsion. Le couple est appliqué à une extrémité du cylindre produisant un cisaillement considéré constant sur toute la longueur.

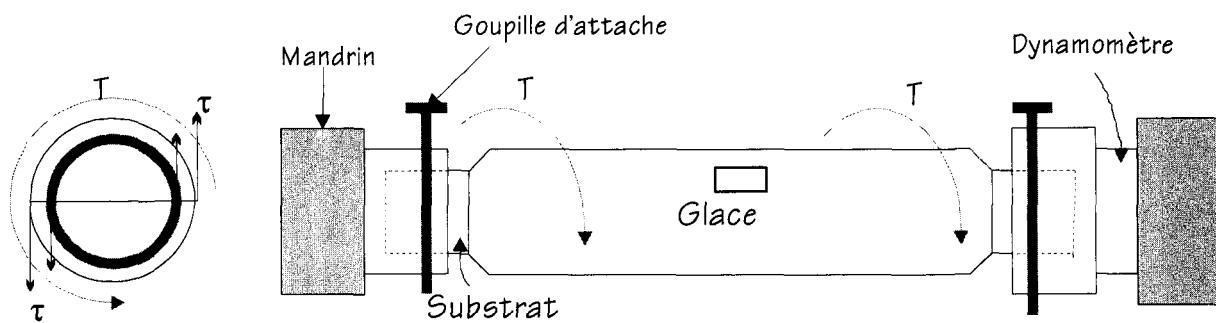


Figure 4-8 : Schéma de chargement : essai de torsion

Les équations associées aux modèles mécaniques utilisés pour déterminer les différentes valeurs de contraintes sont présentées au **Tableau 4-4**. L'échantillon hétérogène composé du substrat d'aluminium ou de nylon recouvert de glace est considéré en régime élastique linéaire où les composants sont isotropes et s'applique la loi de Hooke. **Les contraintes imposées à l'échantillon n'atteignent pas la limite élastique du substrat.** Le calcul de contrainte ne considère pas les diminutions d'épaisseur de la glace aux bouts de l'échantillon de glace. L'épaisseur de glace est donc considérée comme constante sur toute la longueur du cylindre. Le **Tableau 4-4** détaille les équations utilisées pour le calcul des contraintes en cisaillement à l'interface.

Si on assume qu'à l'interface l'angle de déformation θ_g dans le glace est la même que celui dans le substrat θ_s pour obtenir l'égalité suivante:

$$\theta_g = \theta_{sub} \quad \text{Équation 4-3}$$

Où :

$$\theta = \frac{TL}{GJ} \quad \text{Équation 4-4}$$

T= couple (N.m)

L= longueur de l'échantillon (m)

G= module de Coulomb (Pa)

J= second moment polaire (m^4)

Si on considère à l'interface, le couple agissant dans la glace T_g et le couple agissant dans le substrat T_s à cette valeur d'angle on obtient :

$$\frac{T_g L}{G_g J_g} = \frac{T_s L}{G_s J_s} \quad \text{Équation 4-5}$$

La longueur de la glace et du substrat étant la même pour les deux matériaux l'expression devient :

$$\frac{T_g}{G_g J_g} = \frac{T_s}{G_s J_s} \quad \text{Équation 4-6}$$

Le couple appliqué sur l'échantillon est le couple total T_T ;

$$T_g + T_s = T_T \quad \text{Équation 4-7}$$

En combinant les deux dernières équations, on obtient :

$$T_g = \frac{T(G_g J_g)}{G_g J_g + G_s J_s} \quad \text{Équation 4-8}$$

$$T_s = \frac{T_g(G_s J_s)}{G_g J_g + G_s J_s} \quad \text{Équation 4-9}$$

Les seconds moments polaires J_g et J_s des tubes cylindriques sont définis par les équations suivantes :

$$J_g = \int_{r_{\text{int}}}^{r_{\text{ext}}} r^2 dA = \int_{r_{\text{int}}}^{r_{\text{ext}}} r^2 (2\pi r dr) = \frac{\pi}{2} ((r_{\text{ext}} + e_g)^4 - r_{\text{ext}}^4) \quad \text{Équation 4-10}$$

$$J_s = \int_{r_{\text{int}}}^{r_{\text{ext}}} r^2 dA = \int_{r_{\text{int}}}^{r_{\text{ext}}} r^2 (2\pi r dr) = \frac{\pi}{2} (r_{\text{ext}}^4 - r_{\text{int}}^4) \quad \text{Équation 4-11}$$

Où :

e_g = l'épaisseur du dépôt de glace (m)

r_{ext} = le rayon à l'interface où le rayon extérieur du substrat (m)

r_{int} = le rayon intérieur du cylindre de substrat (m)

Le cisaillement dans la glace à l'interface s'écrit alors :

$$\tau_{\text{rupture int. glace}} = \frac{T_g r_{\text{ext}}}{J_g} \quad \text{Équation 4-12}$$

Tableau 4-4 : Équations et modèles applicables à l'essai de torsion givré

| Valeurs calculées | Équations | Variables (unités) |
|--|--|--|
| J_g (m^4) | $J_g = \frac{\pi}{2} ((r_{exts} + e_g)^4 - r_{exts}^4)$ | e_g = l'épaisseur du dépôt de glace (m) r_{exts} = le rayon extérieur du substrat (m) |
| J_s (m^4) | $J_s = \frac{\pi}{2} (r_{exts}^4 - r_{int_s}^4)$ | r_{exts} = le rayon extérieur du substrat (m) r_{int_s} = le rayon intérieur du substrat (m) |
| T_g (N.m) | $T_g = \frac{T_T (G_g J_g)}{G_g J_g + G_s J_s}$ | T_T = Couple appliquée $G_g = 3,8 \text{ GPa}^*$ $G_{alu} = 29 \pm 3 \text{ GPa}$ $G_{nylon} = 0,9 \pm 0,4 \text{ GPa}$ |
| $\tau_{rupture \ int. \ glace}$ (MPa) | $\tau_{rupture \ int. \ glace} = \frac{T_g r_{exts}}{J_g}$ | |

* Mesuré par Gold à -5 °C (Michel, 1978)

Le protocole expérimental détaillé ainsi qu'un exemple descriptif des fiches d'essais obtenues lors de l'essai de torsion givré sont présentés, le premier à l'**ANNEXE 1** et le second à l'**ANNEXE 3**.

4.5 DÉTERMINATION DES CRITÈRES DE DÉGLAÇAGE PAR FLEXION

4.5.1 Montage et échantillons

Le montage de l'essai de flexion givré consiste en un bâti (Figure 4-9) muni à la base d'un encastrement où est insérée l'extrémité d'une poutrelle échantillon glacée. L'autre extrémité est poussée par une vis entraînée par un moteur pas à pas produisant une flexion de la poutrelle. La déformation est mesurée à l'aide d'une jauge de déformation collée sur la poutrelle tandis que la force exercée est mesurée par une cellule de charge posée sur l'extrémité de la vis. Un ordinateur doté d'un logiciel de contrôle de type VB, *Délestage*, enregistre en temps réel la déformation et la force appliquée.

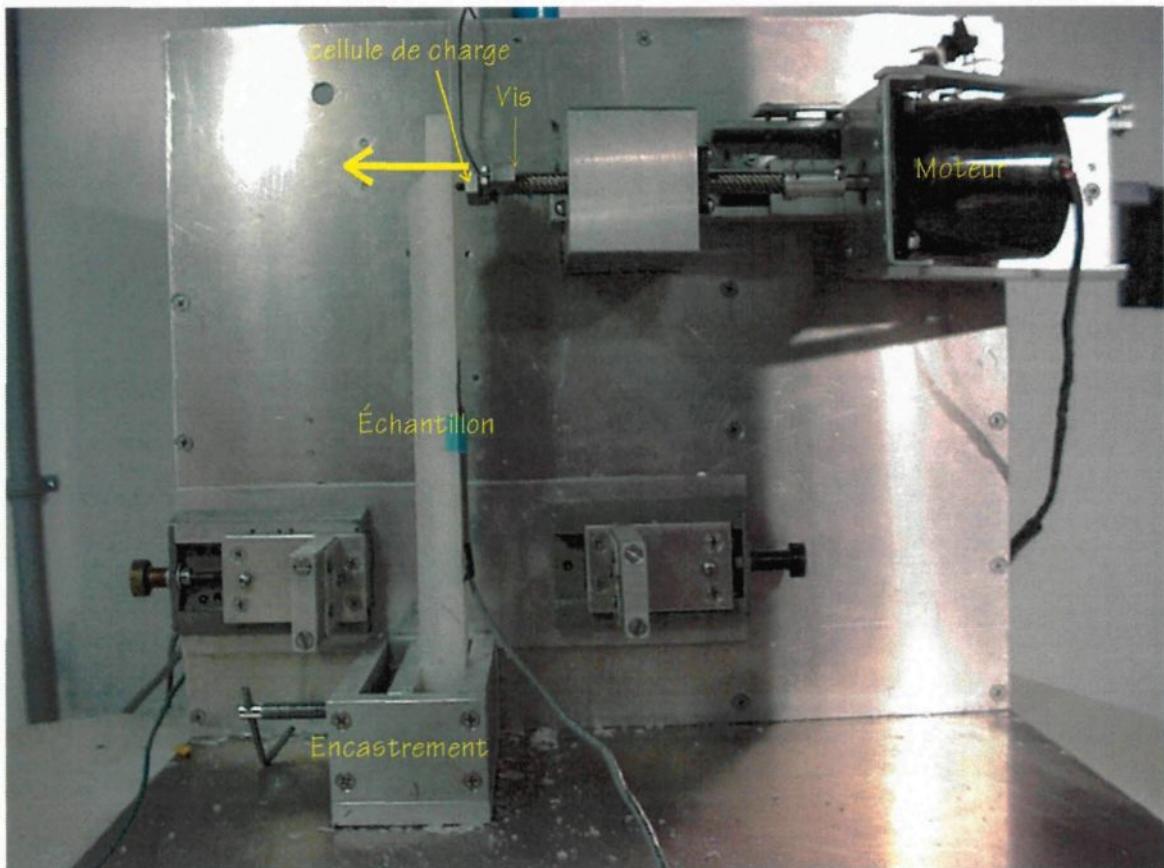


Figure 4-9 : Montage de l'essai de flexion givré

Dans l'essai de flexion givré, la poutrelle échantillon givrée d'une couche de glace d'épaisseur uniforme est soumise à une flexion de la façon illustrée à la **Figure 4-10**. La flexion produit des contraintes normales en tension ou en compression et des contraintes combinées à une contrainte en cisaillement dont les intensités sont fonction de l'épaisseur de glace sur la poutre. La glace décolle ou fissure lorsque le cisaillement et/ou la contrainte normale atteignent la limite de rupture de la glace à l'interface glace-substrat. La déformation de rupture et la force appliquée au moment de la rupture sont déterminées de la même façon que dans les deux essais précédents. Les valeurs des contraintes de rupture sont calculées à partir de la force mesurée à la rupture.

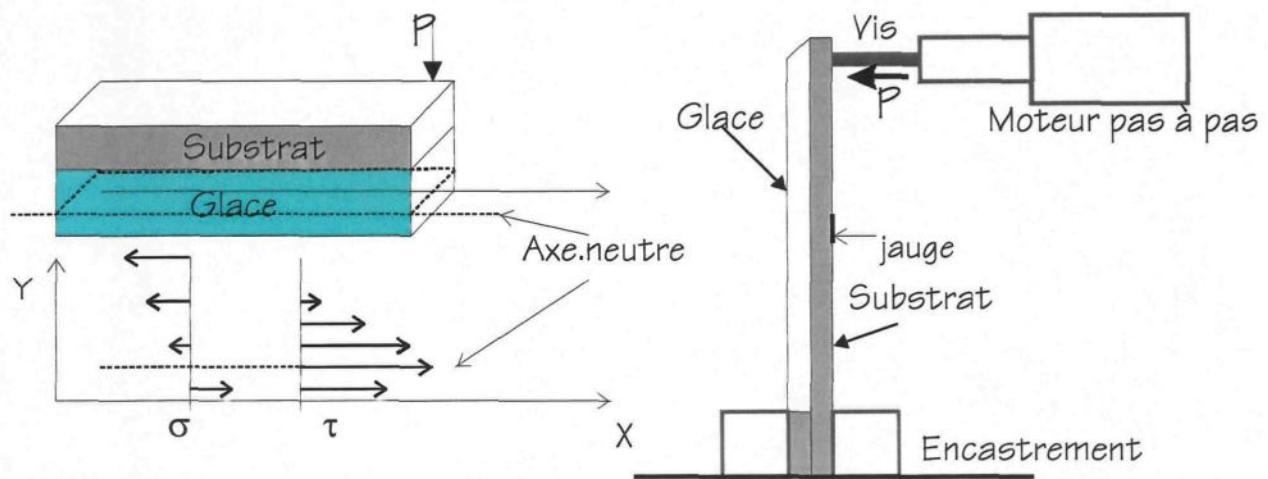


Figure 4-10 : Schéma de chargement : essai de flexion

Les caractéristiques mécaniques des poutrelles échantillons d'aluminium et de nylon utilisées sont détaillées au **Tableau 4-5**. La jauge de déformation a été collée au centre de la section glacée sur la surface non exposée à la glace. La **Figure 4-11** schématise une poutrelle échantillon muni d'un bloc à la base servant à la fixer dans l'encastrement. Ce bloc, assurant un confinement partiel de la glace permet de minimiser la concentration de contraintes dans la glace au voisinage de l'encastrement. Les épaisseurs des échantillons h_s d'aluminium et de nylon ont été prédéterminées de façon à ce que la position relative de l'axe neutre se retrouve au même endroit pour les trois épaisseurs de glace h_g étudiées soit 2, 5 et 10 mm (**Figure 4-12**). Ainsi, avec 2 mm de glace, l'axe neutre se trouve dans le substrat, soumettant l'interface glace/substrat à une compression. Avec 5 mm de glace, l'axe neutre se trouve directement à

l'interface où l'effort en cisaillement est maximum. Enfin, avec 10 mm de glace, l'axe neutre est positionné dans la glace afin de produire une tension à l'interface.

Tableau 4-5 : Échantillons de flexion

| Paramètres/Matériaux | Aluminium 2024 T3 (sablé 400 Grit) | Nylon |
|---|--|--|
| Longueur lame (± 1 mm) | 340 | 340 |
| Longueur glacée ou Longueur de la charge à l'encastrement (± 1 mm) | 254 | 254 |
| Épaisseur lame ($\pm 0,01$ mm) | 1,97 à 2,00 | 12,98 à 13,09 |
| Largueur lame ($\pm 0,1$ mm) | 25,0 | 25,0 |
| Longueur du bloc ($\pm 0,01$ mm) | 50,8 | 50,8 |
| Hauteur du bloc ($\pm 0,1$ mm) | 10,0 | 10,0 |
| Type de jauge | CEA-13-250UW-350 (Vishay Measurements Group, inc.) | |
| Colle à jauge | M Bond 200 (Vishay Measurements Group, inc.) | |
| Facteur de jauge | 2,097 [*] | |
| Revêtement de la jauge | <ul style="list-style-type: none"> • MCOAT A • Silicone 3145 RTV | <ul style="list-style-type: none"> • MCOAT A • Silicone 3145 RTV |

^{*} Ajusté pour -10°C et 4,8 m de fil

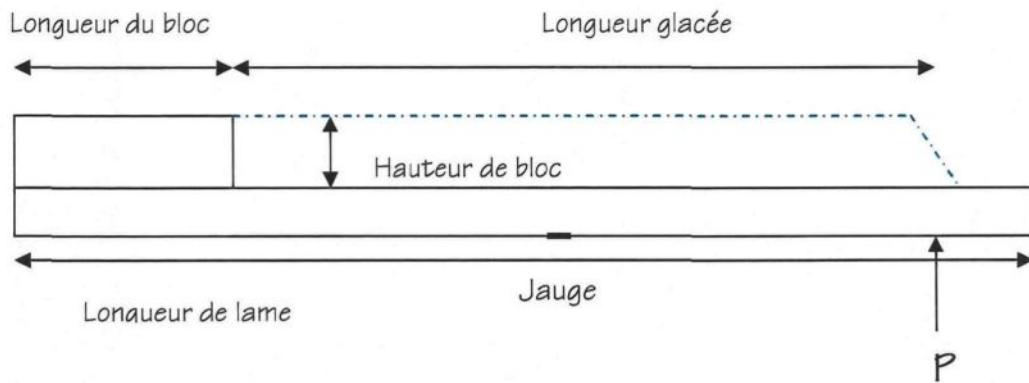


Figure 4-11 : Schéma des échantillons de flexion

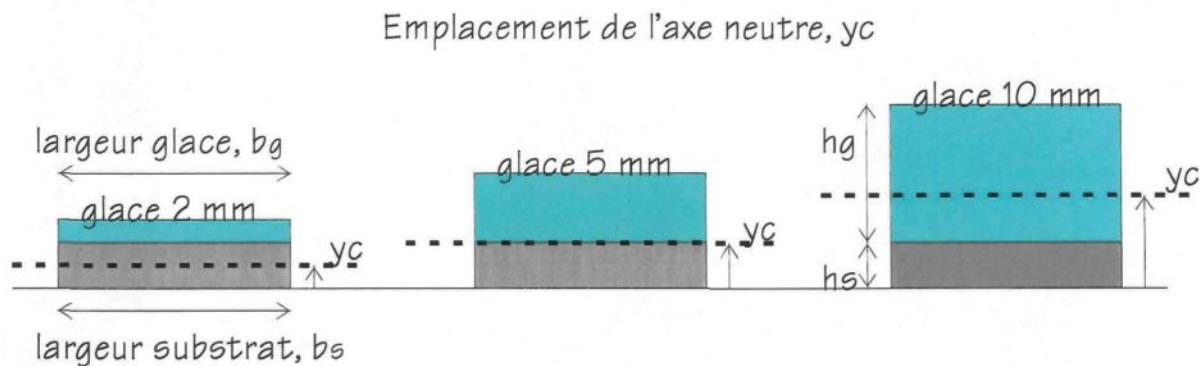


Figure 4-12 : Emplacement de l'axe neutre

4.5.2 Calculs et modèles utilisés

Les équations associées aux modèles mécaniques utilisés pour calculer les différentes valeurs de contraintes sont présentées au Tableau 4-6. L'échantillon hétérogène composé du substrat et de la glace est considéré en régime élastique linéaire où la loi de Hooke est applicable. Tous les composants sont considérés isotropes. Les contraintes imposées à l'échantillon n'atteignent pas la limite élastique du substrat. Le calcul des contraintes ne considère pas

le profil de forme triangulaire au bout de l'échantillon de glace produisant un déplacement de l'axe neutre près de l'encastrement. L'épaisseur de glace est également considérée uniforme sur toute la longueur de la lame. Le tableau **Tableau 4-6** présente le détail des équations utilisées pour le calcul des contraintes.

Tableau 4-6 : Équations et modèles utilisés applicables à l'essai de flexion givré

| Valeurs calculées | Équations | Variables (unités) |
|---|---|--|
| | | |
| y_c, axe neutre (m) Figure 4-12 | $y_c = \frac{A_g y_2 + A_s y_1}{A_g + A_s}$ | A_s = aire substrat (m^2) A_g = aire glace équivalente (m^2) y_1 = axe neutre du substrat (m) y_2 = axe neutre de la glace (m) $A_s = b_s h_s$ $A_g = n b_g h_g$ où $n = \frac{E_g}{E_s}$ |
| I, moment d'inertie (m^4) | $I = \frac{b_s \cdot h_s^3}{12} + \frac{n \cdot b_g \cdot h_g^3}{12} + A_g (y_c - y_2)^2 + A_s (y_c - y_1)^2$ | |
| M, moment (N.m) | $M = P \cdot \frac{l}{2}$ | P = force appliquée (N) l = longueur glacée (m) |
| $\sigma_{\text{rupture int. glace}}$ (MPa) | $\sigma_{\text{rupt.int.glace}} = -\frac{M \cdot y_i}{I} \cdot n$ | y_i = distance de l'interface par rapport à l'axe neutre (m) |
| $\tau_{\text{rupture int. glace}}$ (MPa) | $\tau_{\text{rupt.int.glace}} = \frac{V \cdot Q}{I \cdot b_g} \cdot n$ | Q = Moment statique (m^3) $V = P$, force appliquée (N) ou à 2 mm de glace $Q = b_g n h_g \left[\left(\frac{h_g}{2} \right) + (h_s - y_c) \right]$ à 5 mm de glace $Q = b_s h_s \left(\frac{h_s}{2} \right)$ à 10 mm de glace $Q = b_s h_s \left[\left(y_c - h_s \right) + \left(\frac{h_s}{2} \right) \right]$ |

Le protocole expérimental détaillé ainsi qu'un exemple descriptif des fiches d'essais obtenues lors de l'essai de torsion givré sont présentés à l'**ANNEXE 1** et l'**ANNEXE 4** respectivement.

4.6 MESURES DE LA RUGOSITÉ DES SUBSTRATS ET DE LA DENSITÉ DE LA GLACE

4.6.1 Mesure de la rugosité des substrats

La rugosité est mesurée avec un rugosimètre électronique (**TIME TR100, Surface Roughness Tester**, GENEQ inc) conçu pour évaluer la rugosité de surfaces métalliques et non métalliques. La rugosité mesurée est exprimée en terme de Ra, définie comme étant la moyenne arithmétique de la déviation du profil. La déviation du profil est mesurée par le déplacement linéaire d'un capteur perpendiculaire à la surface étudiée. Le mouvement du capteur glissant sur les creux et les pics de la surface texturée est converti en signal analogique. Après traitement, ce dernier est reconvertis en signal digital permettant le calcul statistique du Ra évalué en μm avec un seuil de 0,05 μm et un maximum mesurable de 10 μm .

Les procédures sont celles décrites dans le manuel d'utilisation de l'appareil TIME TR100 par GENEQ inc (www.geneq.com). Pour chaque échantillon non glacé, la valeur de rugosité comporte huit (8) mesures sur une distance minimale de **0,25 mm**.

4.6.2 Mesure de la densité de la glace

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 est mesurée avec une balance précise au centième de gramme. Le volume est obtenu à partir de la variation de volume d'un fluide de densité connue dans lequel le morceau de glace est immergé.

4.7 ESSAIS DE DÉGLAÇAGE AVEC 3 MATÉRIAUX ACTIFS

Cette section décrit trois séries d'expériences simples et complémentaires aux travaux de cette thèse. Les matériaux actifs étudiés dans cette section ont été choisis par rapport à leur disponibilité au moment de la recherche.

4.7.1 Muscle McKibben

L'expérimentation effectuée avec le muscle McKibben se divise en deux parties : la caractérisation de sa déformation sous pression et l'essai de déglaçage. Le système est décrit à la section 3.3.1 et la **Figure 4-13** montre une photographie du système construit au laboratoire.

Il a été construit selon des données techniques tirées du site web : www-rcs.ee.washington.edu/BRL/devices/mckibben/



Figure 4-13 : Système McKibben

Pour la caractérisation du muscle McKibben, 3 essais ont été effectués à des pressions croissantes soit 20, 40, 60 et 80 psi (137, 275, 413, 551 kPa) durant lesquels des capteurs de type LVDT mesurent l'augmentation du diamètre du cylindre en temps réel. Ces mesures permettent de calculer la déformation et la vitesse de déformation du cylindre activé et d'évaluer le niveau de répétitivité. Pour le déglaçage, cinq (5) essais ont été réalisés durant lesquels est activé le muscle pneumatique préalablement givré et où est évalué qualitativement le déglaçage obtenu.

Le montage comprend le muscle McKibben encastré sur le montage en flexion auquel on a ajouté les deux capteurs LVDT de chaque côté du muscle. Les signaux des LVDT préétalonnés sont enregistrés en temps réel par un ordinateur (**Figure 4-14**).

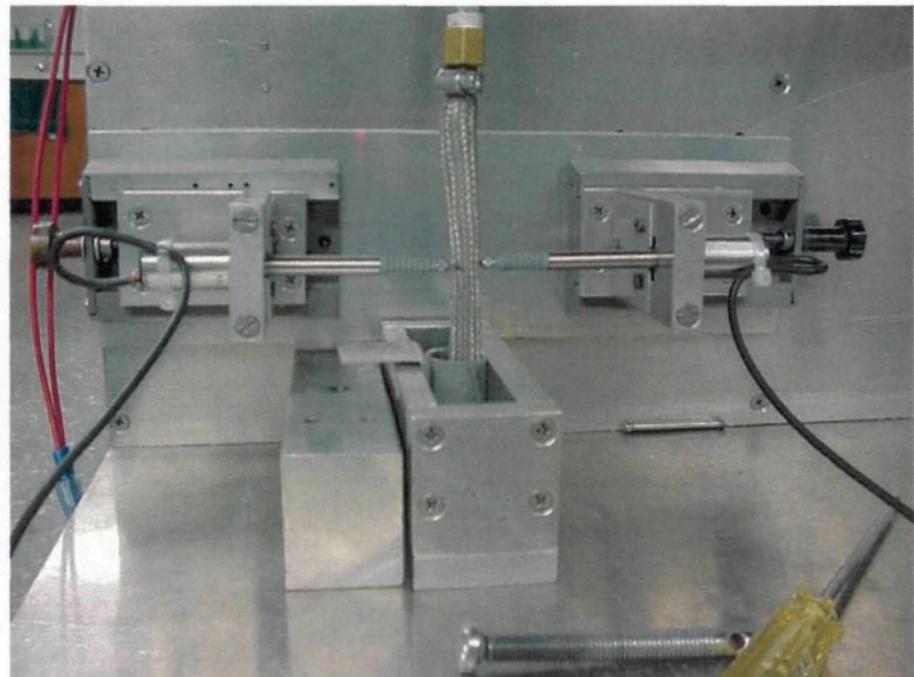


Figure 4-14 : Montage du système McKibben

4.7.2 Polymère électroactif (CPMI)

Voici un tableau incluant les principales caractéristiques de la membrane CPMI tels que fournis par le manufacturier :

Tableau 4-7 : Caractéristiques du fabricant : Muscle Sheet™ MS-417*

| | |
|------------------------------|---|
| Nom | MuscleSheet® |
| Temps de réponse | 10-80 ms (20-1 Hz d'entrée) |
| Puissance estimée | 100 mW/cm² @1 volt d'entrée |
| Courant d'utilisation | 50-100 mA/cm² (une membrane, dépendant de la grandeur) |
| Volage d'utilisation | 0.1-7.0 V (une membrane, dépendant de la grandeur) |
| Flexion | 100 % de la longueur effective et plus de ±90 degrés |
| Force développée | 10-50 fois son poids (une membrane, dépendant de la grandeur et du voltage) |
| Matériel de base | Un composite métal-polymère aux propriétés hydrophiles |
| Épaisseur | 0.008-0.020 " (0.2mm-0.5mm) |
| Module d'Young | 600 MPa |

* Fabricant: Biomimetic Products, Inc.
46532 Hollymead Place
Sterling, VA 20165-6141

Voici un aperçu de la membrane dont le principe d'activation est décrit à la section 3.3.2.

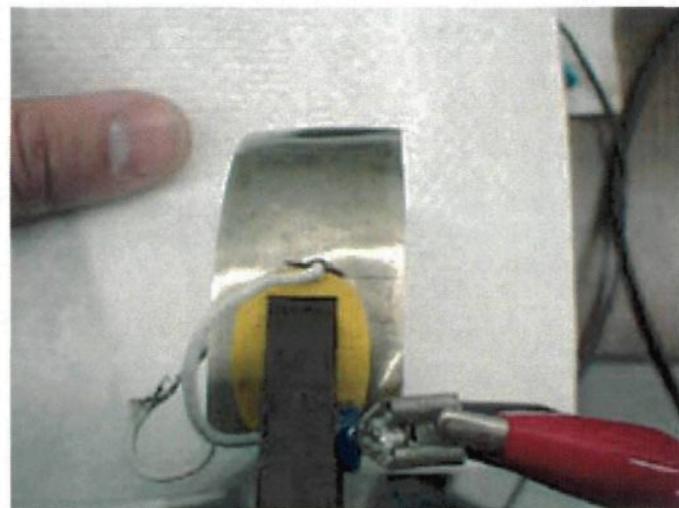


Figure 4-15 : Membrane IMPC

La surface de la membrane reçue est de 100 cm². Cependant, cette membrane peut être découpée et redimensionnée. Un morceau de membrane, muni de pinces conductrices a été installé à la verticale car à cette position, la déflexion du muscle est au maximum selon les résultats d'essais effectués (Figure 4-16). Le tout a été installé sur un statif muni d'une feuille graduée servant à mesurer la déflexion et branché à une source (*TENMA Laboratory DC power supply, 72-2005*)

La membrane a été caractérisée (voltage vs déflexion) à la température de la pièce soit à 24°C et à -5°C et soumise à un essai de déglaçage. Pour ce faire, aucun protocole expérimental n'a été établi. Le comportement de la membrane étant imprévisible. Les manipulations consistaient grossièrement à appliquer différents voltages et à mesurer la déflexion obtenue.

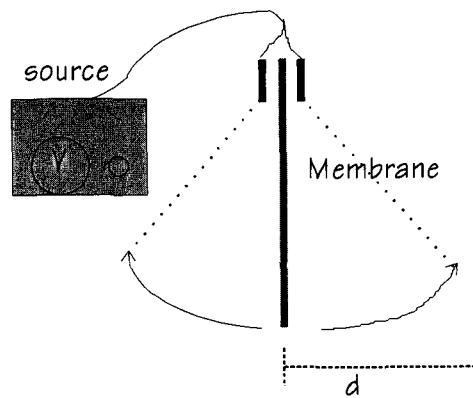


Figure 4-16 : Schéma partiel du montage vertical

4.7.3 Composite piézoélectrique (MFC)

Le potentiel d'utilisation d'une membrane flexible piézoélectrique comme activateur d'un système de déglaçage a été expérimenté. Cette membrane développée au NASA *Langley Research Center* et commercialisée par la compagnie allemande MFC *Macro Fiber Composite*. Elle consiste en une série de tiges rectangulaires en céramique piézoélectrique (PZT, *Piezo Lead Zirconate Titanate*) placées en sandwich entre deux films d'adhésifs et d'électrodes de polyimide. Son mécanisme d'activation est décrit à la section 3.3.3. L'ensemble des fibres piezos activées crée une expansion de la membrane pouvant produire une flexion lorsqu'elle est fixée à une extrémité. Voici les caractéristiques principales des membranes fournies par le manufacturier :

Tableau 4-8 : Caractéristiques principales des MFC* (M 8557 P1 d33)

| | |
|--|------------------|
| Dimensions | 110 mm x 75 mm |
| Surface active | 85 mm x 57 mm |
| Espacement en les tiges | 0.5 mm (20 mil) |
| Capacitance | approx. 14 nF |
| Type de PZT | Navy Type II |
| Voltage maximum | -500 V à +1500 V |
| Déformation en tension maximale | 4500 ppm |
| Épaisseur | approx. 0.3 mm |

*Tiré de la page web : <http://www.smart-material.com/Smart-choice.php?from=MFC>

Deux membranes ont été caractérisées, à deux (2) températures soit ambiante et à -10 °C, en mesurant la force en fonction de la fréquence et le voltage appliqué. La **Figure 4-17** est le schéma du montage utilisé pour cette caractérisation. La force mesurée est celle évaluée à partir du poids maximum que la membrane peut soulever lorsque celui-ci est placé au bout tel qu'illustré à la **Figure 4-18**.

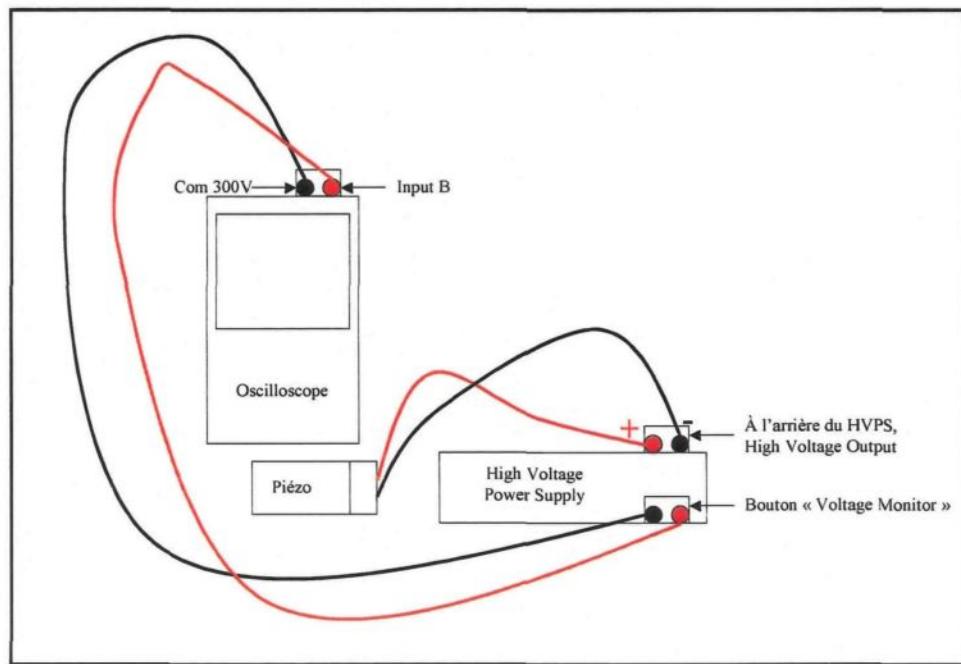


Figure 4-17: Schéma du montage de caractérisation MFC



Figure 4-18: MFC soumis à un poids

CHAPITRE 5

VALIDATION DES MONTAGES

5. VALIDATION DES MONTAGES

5.1 INTRODUCTION

Le chapitre 5 présente les résultats des essais de traction, torsion et flexion effectués avec des échantillons sans glace afin de valider les mesures expérimentales.

5.2 PRÉCISION ET EXACTITUDE

Les travaux de cette thèse reposent sur des mesures de déformations effectuées avec trois nouveaux montages où les échantillons glacés sont sollicités mécaniquement via le substrat. C'est la première fois que ces trois montages sont utilisés pour mesurer la déformation de rupture d'échantillons glacés soumis à trois différents modes de sollicitation, la traction, la torsion et la flexion. Pour cette raison, il a fallu valider en premier lieu la qualité des mesures obtenues avec ces nouveaux montages. Cette évaluation a été réalisée dans des essais d'étalonnage avec des échantillons sans glace en faisant ressortir les deux points suivants : la précision des mesures et leur justesse (ou l'exactitude). La précision est normalement évaluée en répétant plusieurs fois une mesure dans les mêmes conditions tandis que l'exactitude est normalement évaluée par comparaison avec des valeurs de références connues.

5.3 DÉTERMINATION DES ERREURS DE MESURE

Les valeurs mesurées avec les trois montages sont la déformation et la force ou le couple exercé directement sur le substrat. La déformation est mesurée à l'aide de jauge de déformation tandis que la force et le couple sont déterminés à l'aide de cellules de charge

appropriées. Toutes les jauge et cellules de charge ont été étalonnées après leur installation à température ambiante et à -10 °C. Les régressions linéaires d'étalonnage ont toutes des coefficients de corrélation linéaire entre 0,9999 et 0,9998 démontrant le bon fonctionnement des capteurs (jauge bien collées aux surfaces, stabilité des signaux) et l'exactitude des mesures de force ou de couple. La **précision des mesures** a été évaluée en comparant les mesures obtenues lors d'essais de déformation répétés avec un échantillon **sans glace**. Enfin, l'**exactitude ou la justesse** a été évaluée en comparant les modules d'Young des substrats calculés à partir des données expérimentales aux valeurs de références.

5.4 MONTAGE DE TRACTION

5.4.1 Uniformité de la déformation mesurée

Les essais de traction avec échantillon givré ont été effectués avec une lame échantillon instrumenté d'une jauge collée au centre de la surface non glacée. Dans ces essais, on considère que la déformation est uniforme lors de la traction sur toute la longueur de l'échantillon. Cette hypothèse apparaît raisonnable pour l'aluminium mais un peu moins pour le nylon, un matériau viscoélastique. Afin de vérifier si la viscoélasticité exerce quelques effets aux niveaux et aux vitesses de déformation utilisées, deux jauge de déformation ont été collées sur un même échantillon de nylon à 2 cm de distance l'une de l'autre. La **Figure 5-1** montre les deux (2) courbes de la charge en fonction de la déformation mesurée lors d'un même essai par les deux jauge.

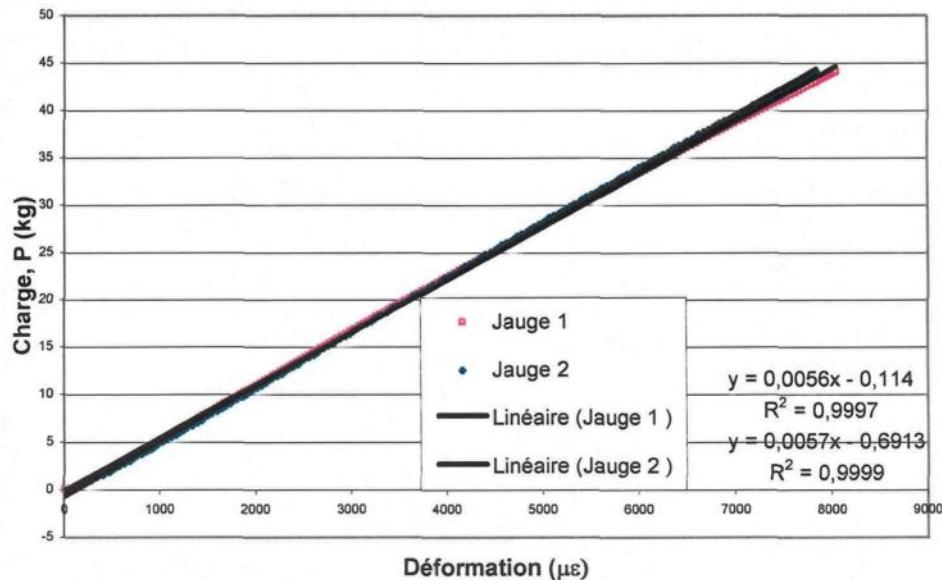


Figure 5-1 : Charge en fonction de la déformation en traction du Nylon

Les deux courbes obtenues avec le nylon ne se différencient pas significativement à des valeurs de déformation inférieures à 5000 $\mu\epsilon$. La concordance entre les deux tracés montre que la déformation mesurée est indépendante de la position de la jauge sur l'échantillon. L'emplacement de la jauge au milieu des échantillons est donc jugé représentatif de la mesure de la déformation sur toute la longueur.

5.4.2 La répétitivité des mesures de charge et de déformation

Les Figure 5-2 et Figure 5-3 présentent les données brutes enregistrées lors de deux essais de traction effectués avec un échantillon d'Al 2024 T3 non glacé. La première figure (Figure 5-2) présente la déformation et la charge telles qu'enregistrées en fonction du temps et la deuxième figure (Figure 5-3) présente la déformation en fonction de la charge.

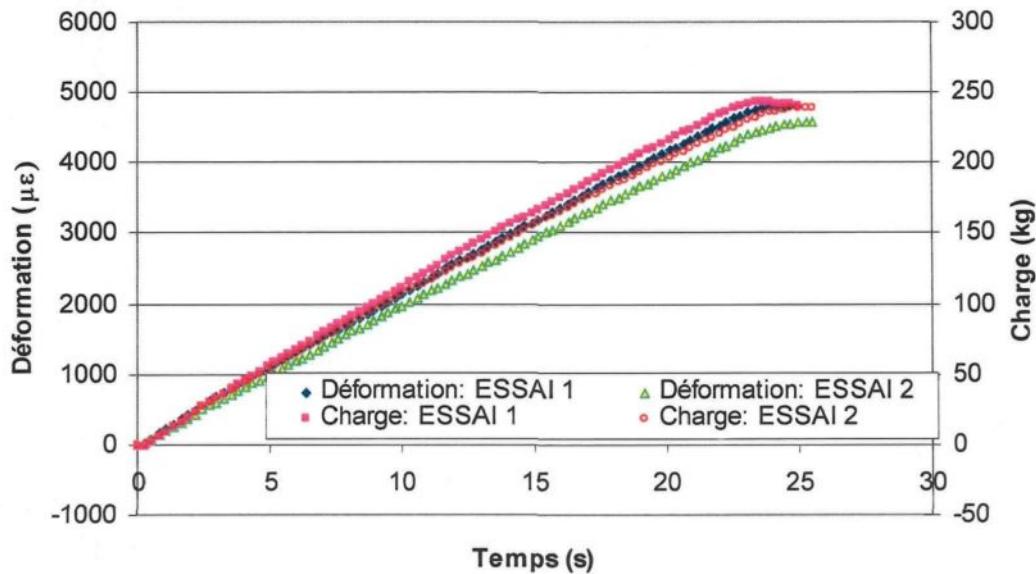


Figure 5-2 : Déformation et charge en fonction du temps lors d'un essai de traction répété avec une lame en Al 2024 T3 non givré (-10 °C)

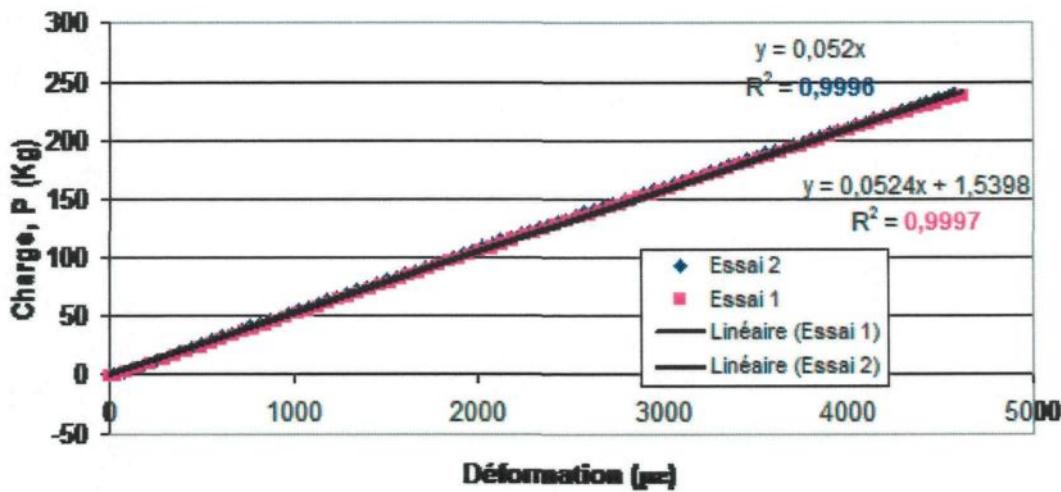


Figure 5-3 : Essai de traction répété avec une lame en Al 2024 T3 non givré (-10 °C)

La faible dispersion des points des deux courbes, exprimée statistiquement par les coefficients de corrélation r^2 , de 0,9996 et 0,9997, montre que les signaux de la jauge et de la cellule de

charge sont stables et que les bruits électromagnétiques sont négligeables. Le fait qu'elle suive parfaitement le mouvement linéaire de l'échantillon pendant la traction malgré la température froide de -10 °C indique également que le collage de la jauge est adéquat. La mesure est répétable car les courbes de la déformation versus la charge de deux essais différents se chevauchent. En effet, l'écart entre les pentes obtenues n'est que de 0,0004 kg/ $\mu\epsilon$ ou 0,8%. Donc, la répétitivité des données brutes est de l'ordre de 1%.

5.4.3 La justesse des mesures

La justesse de la mesure peut être estimée à partir des pentes des courbes de la contrainte en fonction de la déformation déterminant les modules d'Young de l'échantillon. La moyenne des pentes obtenues dans quatre (4) essais de traction avec l'aluminium 2024 T3, est de 71 ± 2 GPa. Le module de rigidité obtenu expérimentalement correspond à celui de référence de 72,4 GPa. Pour le nylon, les modules de rigidité calculés à partir des pentes des deux courbes de la Figure 5-1, sont de 2,69 GPa et de 2,73 GPa. Ces résultats concordent avec le module de référence du nylon compris généralement entre 2 et 5 GPa. La concordance de ces valeurs montre l'exactitude des mesures de charge et de déformation.

5.5 LE MONTAGE DE TORSION

5.5.1 Effet du trou sur la déformation mesurée

Comme il a été expliqué à la section 4.4.1, les tubes ont dû être percés d'un trou d'environ un millimètre de diamètre près de l'emplacement de la jauge pour y laisser passer les fils de connexion. Afin de vérifier si la concentration de contrainte provoquée par le trou influence les

déformations mesurées à la position de la jauge, un essai comparatif a été effectué avec deux tubes, l'un percé et l'autre sans trou. Le graphique suivant présente les deux courbes obtenues.

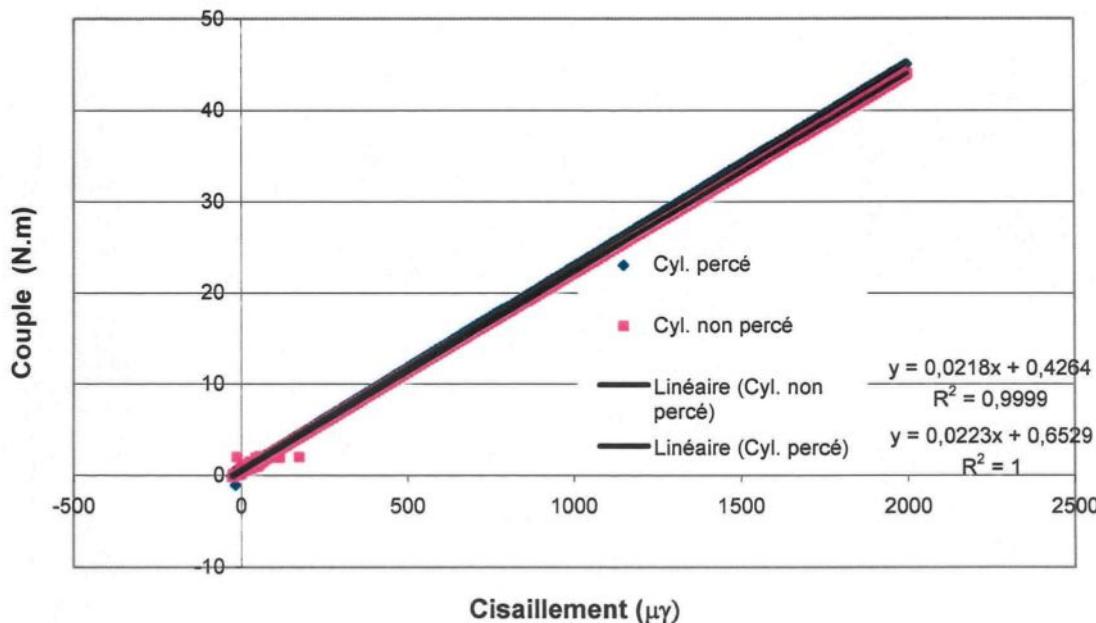


Figure 5-4 : Couple en fonction du cisaillement mesuré pour un tube percé et un tube non percé d'Al 2024 T3

Les deux courbes sont parfaitement linéaires (r^2 de 0,9999 et 1,0000) mais avec des pentes légèrement différentes soit 0,0218 et 0,0223 N.m/ $\mu\gamma$. Au niveau de déformation supérieure à 1000 $\mu\gamma$, la valeur du couple mesurée avec le tube percé est de 2 % plus élevée que celle obtenue avec le tube non percé. Comme les déformations mesurées lors du bris de la glace restent inférieures à 1000 $\mu\gamma$, l'effet du trou sera considéré comme négligeable sur les mesures de déformation de rupture.

5.5.2 La répétitivité des mesures du couple et du cisaillement

La même procédure d'étalonnage utilisée lors de la validation du montage en traction a été appliquée au montage en torsion. La répétitivité des mesures brutes du cisaillement et du couple a été évaluée à partir de quatre (4) essais effectués -10 °C avec quatre (4) tubes échantillons d'Al 2024 T3 sans glace. La Figure 5-5 montre les courbes du couple en fonction de la déformation obtenues lors des essais tandis que le Tableau 5-1 donne les pentes avec les coefficients de corrélation linéaires.

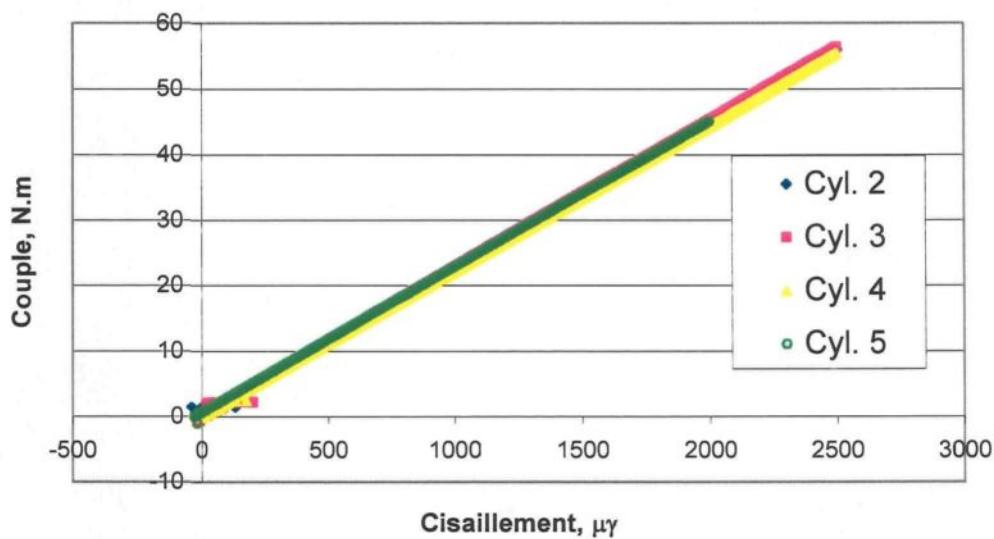


Figure 5-5 : Couple en fonction du cisaillement des tubes d'Al 2024 T3 sans glace

Tableau 5-1 : Pentes des droites de la Figure 5-5

| Numéros de cylindre d'Al 2024 T3 | Pente des droites (N.m/ $\mu\gamma$) | Coefficients de corrélation, r^2 |
|-------------------------------------|--|---------------------------------------|
| #2 | 0,0224 | 0,9999 |
| #3 | 0,0225 | 0,9999 |
| #4 | 0,0221 | 0,9999 |
| #5 | 0,0223 | 1,0000 |
| Pente Moyenne \pm écart type | 0,0223 \pm 0,0002 | |

Les courbes obtenues avec les 4 échantillons différents présentent une linéarité presque parfaite. Les pentes des courbes obtenues varient entre 0,0225 et 0,0221 N.m/ $\mu\gamma$ avec un écart type de 0,0002 correspondant à 0,9 % d'erreur sur les données brutes.

5.5.3 La justesse des mesures

Les modules de Coulomb de l'aluminium 2024 T3 calculés à partir des courbes de la Figure 5-5 valent en moyenne 29 ± 3 GPa, ce qui concorde avec la valeur de référence de 28 GPa. La même procédure a été suivie avec des échantillons de nylon sans glace et la valeur moyenne du module de Coulomb obtenu est de $0,9 \pm 0,4$ GPa concordant également avec la plage de valeurs de référence de 0,7-1,4 GPa. Les valeurs de contrainte et de cisaillement mesurées sont donc considérées comme exactes.

5.6 LE MONTAGE EN FLEXION GIVRÉ

5.6.1 La répétitivité des mesures de force et de déformation

L'étalonnage du montage en flexion a été effectué de la même façon qu'avec les deux montages précédents, c'est-à-dire, avec des essais répétés d'échantillon sans glace à -10 °C.

Le **Figure 5-4** présente les courbes de données brutes obtenues lors d'essais de flexion répétés avec une poutre d'aluminium non glacée à des vitesses de flexion variant de 12,7 à 50,8 mm/s.

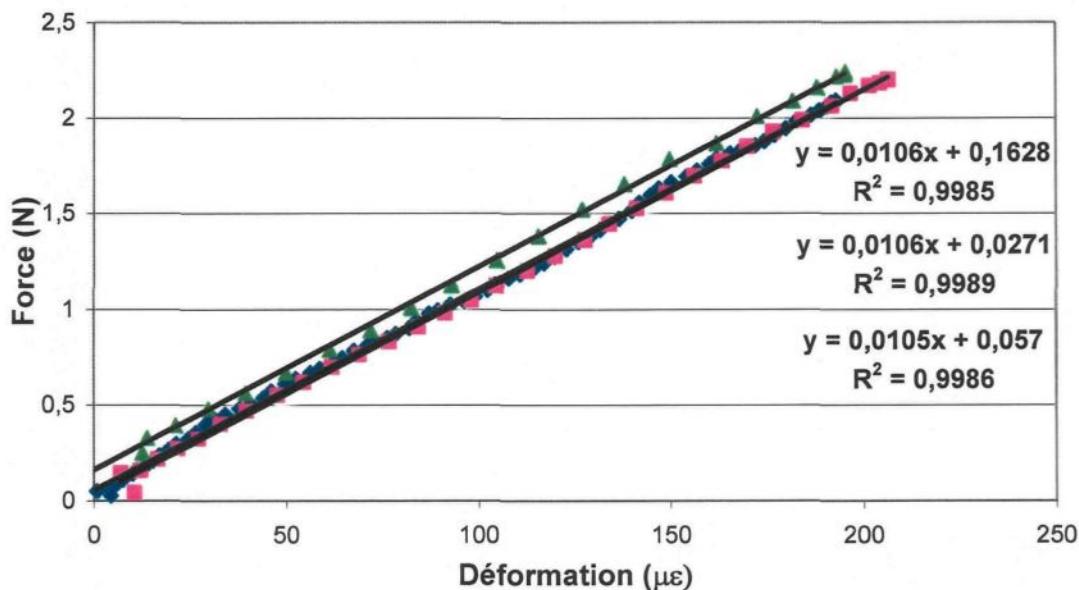


Figure 5-6 : Force en fonction de la déformation lors d'un essai de flexion répété avec une poutrelle d'Al 2024 T3 sans glace

Les trois courbes obtenues sont des droites de pente moyenne de $0,0105 \pm 0,0001$ N/ $\mu\epsilon$ soit variant seulement de 1%. Cette faible variation indique que la vitesse d'essai a un effet négligeable sur les droites obtenues. Par contre, les coefficients de corrélation en flexion sont

plus faibles valant 0,09985 à 0,9989 que ceux de 0,9999 obtenus avec les montages de traction et torsion. Les mesures de l'essai de flexion sont donc moins reproductibles et stables que celles des deux autres essais. Cette plus grande variabilité proviendrait du fait que la cellule de charge est installée directement sur la vis couplée au moteur produisant la flexion, cette dernière étant alors soumise directement aux vibrations du moteur.

Il est possible d'estimer la variation sur la force en se basant sur le coefficient de corrélation de 0,9985. En supposant que l'incertitude sur les déformations est négligeable et que la variabilité est causée principalement par la cellule de charge influencée par le moteur, on peut estimer l'erreur sur la force mesurée à une valeur de 2 à 3%.

5.6.2 Justesse des mesures

En flexion, l'exactitude des mesures et des calculs a été vérifiée de la même façon qu'avec les montages précédents, c'est-à-dire à partir des modules d'Young calculés. Le module d'Young moyen obtenu pour l'aluminium 2024 T3 est de 79 ± 1 GPa, soit une valeur 9% supérieure à la valeur de référence de 72,4 GPa. Cet écart de 9% peut être causé par une erreur dans la lecture de la force ou de la déformation. Il est possible de calculer de façon théorique la déformation à partir de la flèche et des dimensions de l'échantillon. La flèche est calculée avec l'équation suivante (A., Bazergui et al., 1993):

$$f = \frac{PL^3}{3EI} \quad \text{Équation 5-1}$$

Où :

f = flèche (m)

P= force appliquée (N)

L = longueur de l'échantillon (m)

E = module d'Young (MPa)

I = moment d'inertie (m⁴)

La contrainte maximale en tension exercée dans la poutrelle sans glace est donnée par l'équation :

$$\sigma = \frac{-M(e/2)}{I} \quad \text{Équation 5-2}$$

Où : e = épaisseur de la poutre (m)

$$M = P \cdot l_j \quad (\text{N.m}) \quad \text{Équation 5-3}$$

l_j = longueur de la jauge à la force (m)

À partir de la définition du module d'Young (E = σ/ε) et l'Équation 5-2 on peut écrire :

$$E = \frac{P \cdot l_j \cdot e}{2 \cdot I \cdot \epsilon} \quad \text{Équation 5-4}$$

En combinant l'Équation 5-4 et l'Équation 5-1 on obtient pour la flèche :

$$\epsilon = \frac{3 \cdot e \cdot l_j}{2 \cdot L^3} \cdot f \quad \text{Équation 5-5}$$

Les calculs montrent que pour une déflexion de 10 mm, la déformation pour une poutre d'aluminium 2024 T3 est de 200 με. Pour la même flèche, dans trois essais à différentes vitesses, la déformation mesurée par la jauge, est en moyenne de 198 ± 5 με correspondant à seulement 1% d'écart. Donc, l'écart de 9% trouvé pour le module d'Young serait principalement attribuable à l'erreur dans le calcul de la contrainte à partir de la charge et des

dimensions de l'échantillon. Pour cette raison, on considérera que les contraintes de rupture en flexion évaluées à partir de la charge de rupture présentent une erreur systématique de l'ordre de 9%.

5.6.3 Qualité des montages

Les trois nouveaux montages peuvent être considérés comme précis, c'est-à-dire que les mesures sont répétitives et exactes, les valeurs mesurées étant les mêmes d'un échantillon à l'autre et d'une vitesse à l'autre. Le Tableau 5-2 compare les différentes erreurs déterminées lors de la validation des montages en traction, torsion et flexion. L'erreur y est exprimée en termes de la répétitivité et de la justesse. En conclusion, la précision des mesures obtenues avec les trois montages devrait permettre de discerner les changements de rigidité observés lors du bris du dépôt de glace.

Tableau 5-2 : Imprécision des mesures et des calculs

| Mesures ou calculs | Traction | Torsion | Flexion |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Répétitivité*/Justesse** | Répétitivité*/Justesse** | Répétitivité*/Justesse** |
| Déformation | 1% / < 2% | 1 % / < 3% | < 3% / < 1% |
| Force | 1% / < 2% | | < 3% / < 9 % |
| Couple | | 1% / <3% | |
| Module d'Young | 3% / 2% | 10% / 3% | 1% / 9 % |

* Écart type des résultats obtenus pour trois essais ou plus

** Écart entre la valeur moyenne mesurée et la valeur de référence

CHAPITRE 6

RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

6. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

6.1 INTRODUCTION

Le **chapitre 6** présente tous les résultats relatifs aux travaux de cette thèse. La rugosité et la rigidité des substrats sont présentées ainsi que la densité et de la taille des grains de la glace. Les résultats d'adhérence de la glace aux différents substrats complètent cette caractérisation.

La deuxième section du chapitre présente les résultats de déformation givrée en traction, torsion et flexion accompagnés d'une analyse visuelle des essais. Les influences de l'épaisseur de glace et de la vitesse de déformation sont également illustrées sous forme de graphiques.

La dernière partie présente les résultats obtenus lors des essais de déglaçage avec les trois systèmes/matériaux actifs soient : Mc Kibben, CPMI et MFC. Ils seront présentés brièvement et leur potentiel d'application sera discuté dans le prochain chapitre.

6.2 CARACTÉRISTIQUES DE LA GLACE ÉTUDIÉE

Cette section présente les résultats des mesures de densité et de la taille des grains de la glace polycristalline produite par précipitation givrante utilisée pour les expérimentations de cette thèse. Ces deux valeurs permettront d'évaluer les contraintes de rupture théoriques.

6.2.1 Contexte de formation

Dans les essais d'adhérence et les trois essais types d'essais de déformation givrés effectués, la glace a été formée en chambre climatique en exposant le substrat-échantillon à la même condition de précipitation surfondue, soit une bruine verglaçante de gouttelettes de 250 µm de DVM à -9 ± 1 °C. Afin d'obtenir un givre de densité uniforme dans les trois types d'essais, les conditions de formation telles que les températures, l'intensité du vent et de la précipitation ont été légèrement modifiées selon l'essai. De cette façon, la glace obtenue a toujours été du même type, soit un givre dur translucide avec une surface légèrement écaillée, comme il est possible de le voir aux photos des figures suivantes : **Figure 6-1**, **Figure 6-2**, **Figure 6-3**. Ce type de glace est très représentatif des dépôts de glace atmosphérique qui se forment au niveau du sol dans les conditions naturelles. De plus, ses caractéristiques mécaniques de résistance et d'adhérence sont bien documentées à la température de -10 °C retenue pour les essais.

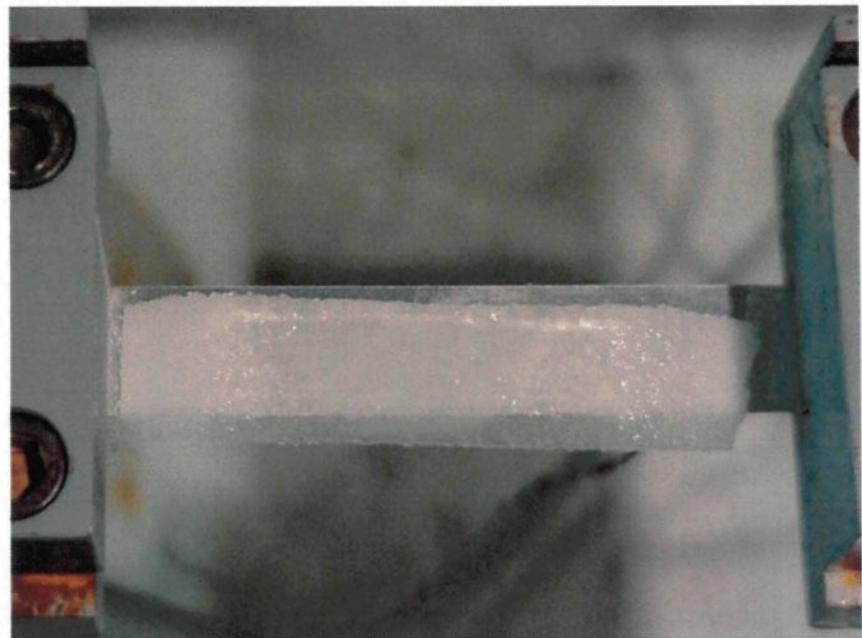


Figure 6-1: Échantillon de glace typique de l'essai de traction givré

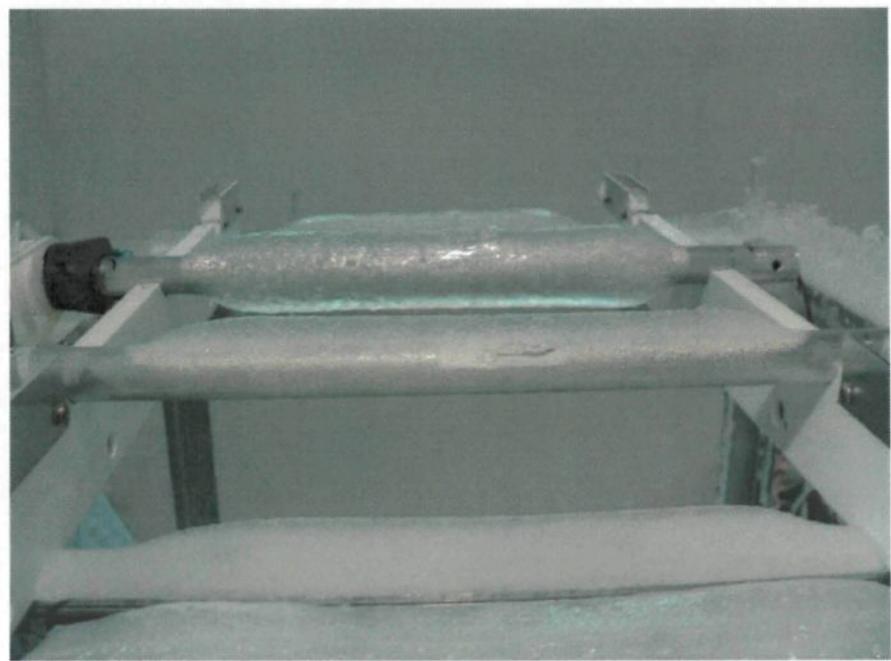


Figure 6-2: Échantillon de glace typique de l'essai de torsion givré

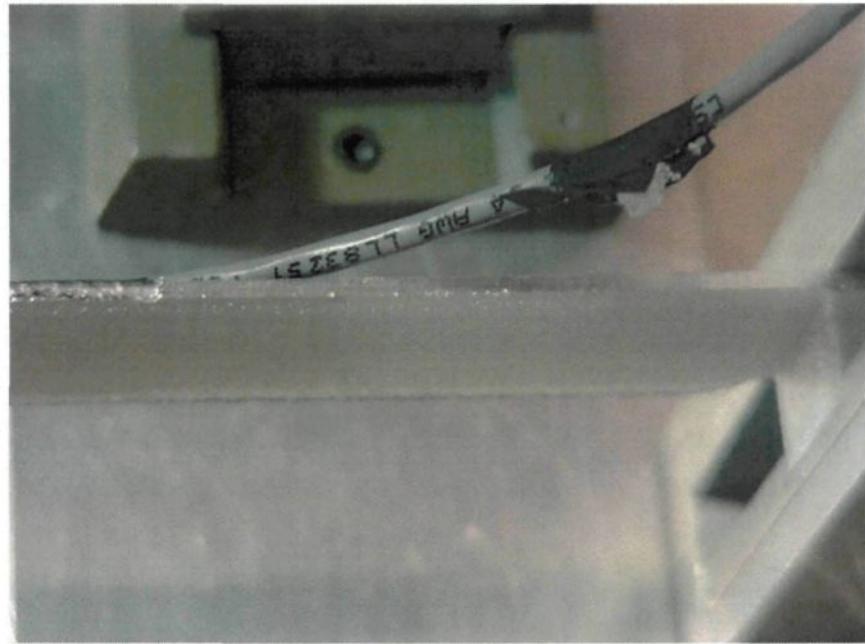


Figure 6-3: Échantillon de glace typique de l'essai de flexion givré

Dans tous les essais, la porosité des échantillons de glace a été caractérisée par la mesure de la densité alors que la texture cristalline l'a été par la mesure de la taille moyenne des grains d_{moy} .

6.2.2 Densité

La densité de la glace polycristalline a été mesurée selon la méthode décrite à la section 4.6.2 dans l'essai d'adhérence et les essais de déformation givrés en traction, torsion, flexion. La densité moyenne de la glace est de $0,89 \pm 0,01$ soit $890 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ (Tableau 6-1).

Tableau 6-1 : Résultats des mesures expérimentales de la densité

| Essais | Densité g/cm ³ |
|-----------------------------|----------------------------------|
| Adhérence par centrifugeuse | 0,897 0,903 0,900 |
| Traction givrée | 0,891 0,888 0,897 |
| Torsion givrée | 0,910 0,870 0,910 0,890 |
| Flexion givrée | 0,870 0,880 0,870 |
| Moyenne | 0,89 ± 0,01 |

6.2.3 Taille des grains

La taille moyenne des grains, d_{moy} , a été déterminée selon la méthode des intersections à partir de la micrographie de la Figure 6-4 d'un échantillon de glace produit en chambre climatique dans les mêmes conditions atmosphériques que celles des trois essais de déformation givrés, soit sous une bruine verglaçante à une température de -10 °C. Les grains présentent une taille moyenne d_{moyen} de **1,6 ± 0,2 mm**. Cette dernière valeur donne seulement un ordre de grandeur de la taille des grains car elle n'est pas statistiquement valable vue le faible échantillonnage.

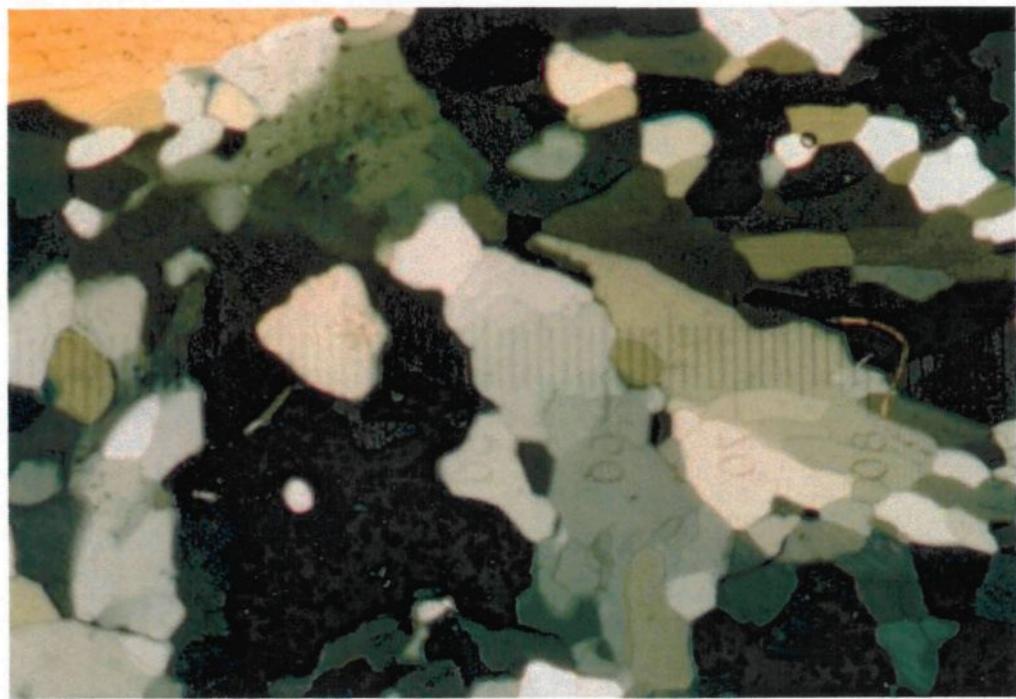


Figure 6-4: Micrographie de glace produite en chambre climatique à -10 °C
(Grossissement : 8 x)

6.3 NATURE DES SUBSTRATS ÉTUDIÉS

Trois matériaux ont été utilisés comme substrats lors des essais de déformation givrés soit : l'aluminium 2024 T3, l'aluminium 3105 H14 et le nylon.

6.3.1 Rugosité

La rugosité a été mesurée sur les substrats sans glace selon la méthode décrite dans la section

4.6. Le Tableau 6-2 présente les mesures de rugosité exprimée en terme de la rugosité moyenne R_a (*Roughness Average*).

Tableau 6-2: Rugosité des échantillons non glacés

| Échantillons | Rugosité, R_a (μm) | Moy. (μm) | É. type (μm) |
|-------------------|---|------------------------|---------------------------|
| Al 2024 T3 | | | |
| Traction | 0,08-0,11-0,09-0,07-0,11-0,10-0,08-0,15 | 0,10 | 0,03 |
| Torsion | 0,35-0,56-0,63-0,47-0,38-0,60-0,36-0,60 | 0,49 | 0,12 |
| Flexion | 0,13-0,12-0,13-0,12-0,12-0,12-0,10-0,09 | 0,12 | 0,01 |
| 3105 H14 | | | |
| Traction | 0,09-0,08-0,09-0,11-0,07-0,09-0,08-0,10 | 0,09 | 0,01 |
| Nylon | | | |
| Traction | 0,05-0,05-0,03-0,05-0,05-0,03-0,03-0,05 | 0,04 | 0,01 |
| Torsion | 0,22-0,16-0,14-0,14-0,20-0,23-0,16-0,20 | 0,18 | 0,04 |
| Flexion | 0,48-0,43-0,64-0,61-0,34-0,43-0,37-0,38 | 0,46 | 0,11 |

En général, la rugosité des substrats est faible variant entre 0,1 à 0,5 μm . Pour le même matériau, la rugosité varie d'un type d'essai à l'autre. Par exemple, la rugosité des échantillons d'aluminium 2024 T3 destinés aux essais de traction est de $0,10 \pm 0,03 \mu\text{m}$ alors que celle des échantillons du même matériau des essais de torsion augmente à $0,49 \pm 0,12 \mu\text{m}$. En raison de cette différence, l'adhérence de la glace ne peut pas être considérée la même d'un type d'essai à l'autre même si les échantillons sont faits du même matériau.

6.3.2 L'adhérence de la glace aux substrats

Deux séries d'essais d'adhérence ont été effectuées avec la centrifugeuse. Un échantillon consiste en une poutre d'aluminium dont un bout a été recouvert d'un morceau de 10 cm² du substrat taillé dans les feuilles servant à la préparation des échantillons de traction. L'échantillon de glace est obtenu en givrant l'extrémité de la lame sous une précipitation de bruine verglaçante sur une surface d'environ 5 cm² avec une épaisseur d'environ 6 mm.

Les valeurs d'adhérence mesurée à -10 °C sont présentées au **Tableau 6-3**. L'adhérence mesurée sur les trois substrats est du même ordre de grandeur avec des valeurs moyennes de 0,47 MPa pour le 2024 T3, 0,46 MPa pour le 3105 H14 et 0,49 MPa pour le nylon. L'adhérence de la glace au nylon est légèrement plus élevée mais pas de façon statistiquement significative. Par contre, une plus grande variabilité est observée avec les valeurs mesurées sur le nylon où le coefficient de variation est de 18% comparativement à 13% pour les deux nuances d'aluminium. Tout comme la rugosité, l'adhérence mesurée sur les trois substrats utilisés dans l'essai de traction est similaire.

Tableau 6-3: Adhérence de la glace à -10 °C mesurée par force centrifuge

| $(\rho_{\text{glace}} = 0,87 \pm 0,02)$ | | |
|---|---|--------------------------------------|
| Al 2024 T3 σ_{adh} (MPa) | 3105 H14 σ_{adh} (MPa) | Nylon σ_{adh} (MPa) |
| 0,386 | 0,509 | 0,537 |
| 0,509 | 0,393 | 0,412 |
| 0,508 | 0,423 | 0,598 |
| 0,492 | 0,525 | 0,426 |
| $0,47 \pm 0,06$ | $0,46 \pm 0,06$ | $0,49 \pm 0,09$ |
| $0,47 \pm 13\%$ | $0,46 \pm 13\%$ | $0,49 \pm 18\%$ |

6.4 RÉSULTATS DES ESSAIS DE DÉFORMATION GIVRÉS

6.4.1 Méthode de détermination de la déformation de rupture

Pour les trois types d'essai, soit la traction, la torsion et la flexion, la déformation a été mesurée directement sur le substrat à l'aide d'une jauge de déformation. Les déformations de rupture, $\varepsilon_{\text{rupture}}$ ont été déterminées à partir des enregistrements de la déformation et de la force.

Afin d'illustrer la méthode utilisée pour déterminer la déformation de rupture, deux exemples de courbes de traction sont présentés et discutés (**Figure 6-5** et **Figure 6-6**). Dans ces deux figures, la courbe de couleur bleu foncé en pointillé est celle de la contrainte moyenne appliquée (MPa) en fonction de la déformation de l'échantillon givré. La déformation est la mesure directe de la jauge tandis que la contrainte appliquée est la force de traction mesurée divisée par la section de la lame. De façon générale, le recouvrement de la glace fait augmenter la rigidité, l'accroissement augmentant à mesure que le dépôt de glace augmente en épaisseur. Lorsque le dépôt de glace se brise ou se décolle, il y a perte de rigidité de l'échantillon givré, se traduisant par un changement de pente de la courbe. **La déformation de rupture est déterminée au moment où l'on observe ce changement.** Le changement de pente peut être graduel (**Figure 6-5**) ou discontinu avec saut (**Figure 6-6**). Un changement de pente graduel est interprété ici comme étant le fait d'un décollement graduel ou progressif de la glace tandis qu'un changement brusque est causé par une fissuration et/ou un décollement très rapide. Néanmoins, les déformations à la rupture, $\varepsilon_{\text{rupture}}$ présentées à la prochaine section sont celles nécessaires au bris de la glace recouvrant l'échantillon composite, peu importe le changement de pente observé.

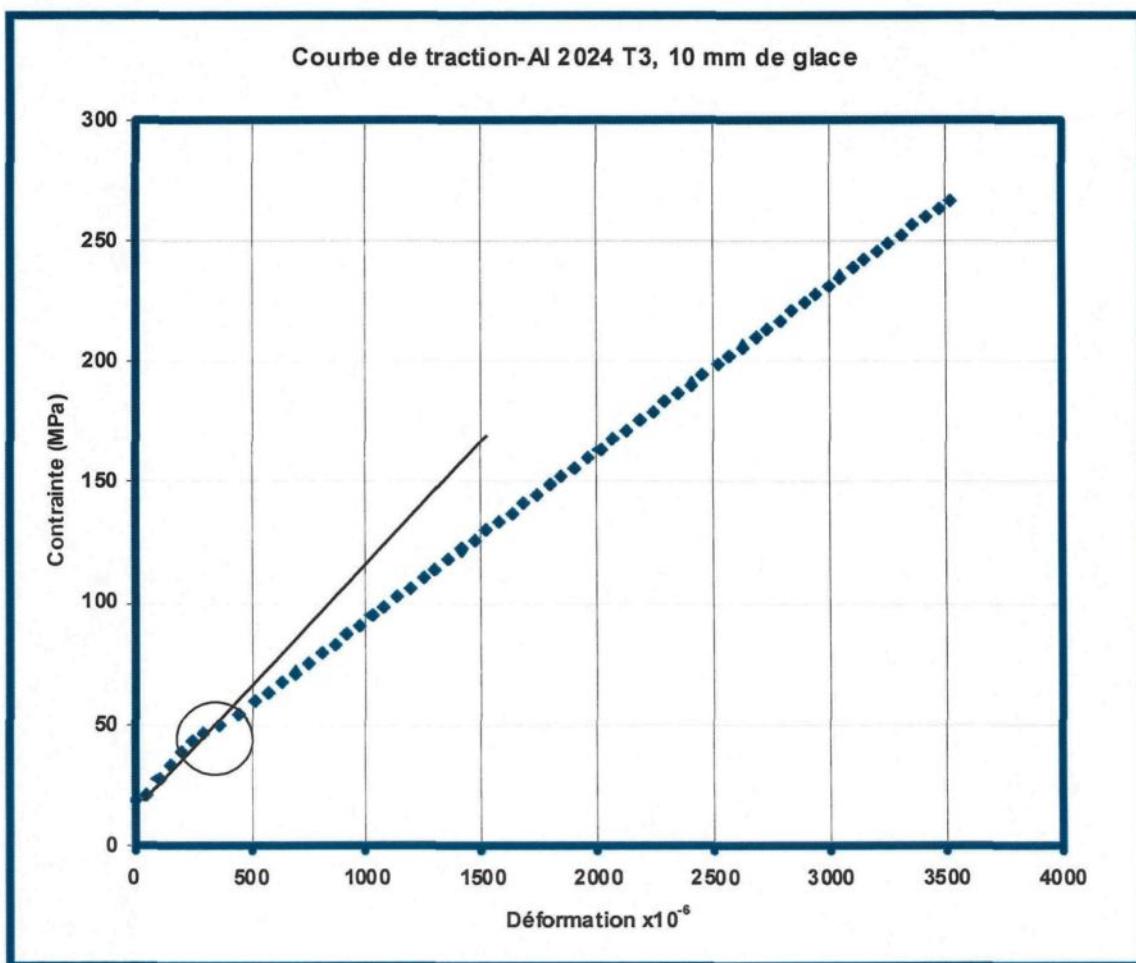


Figure 6-5: Changement de pente graduel

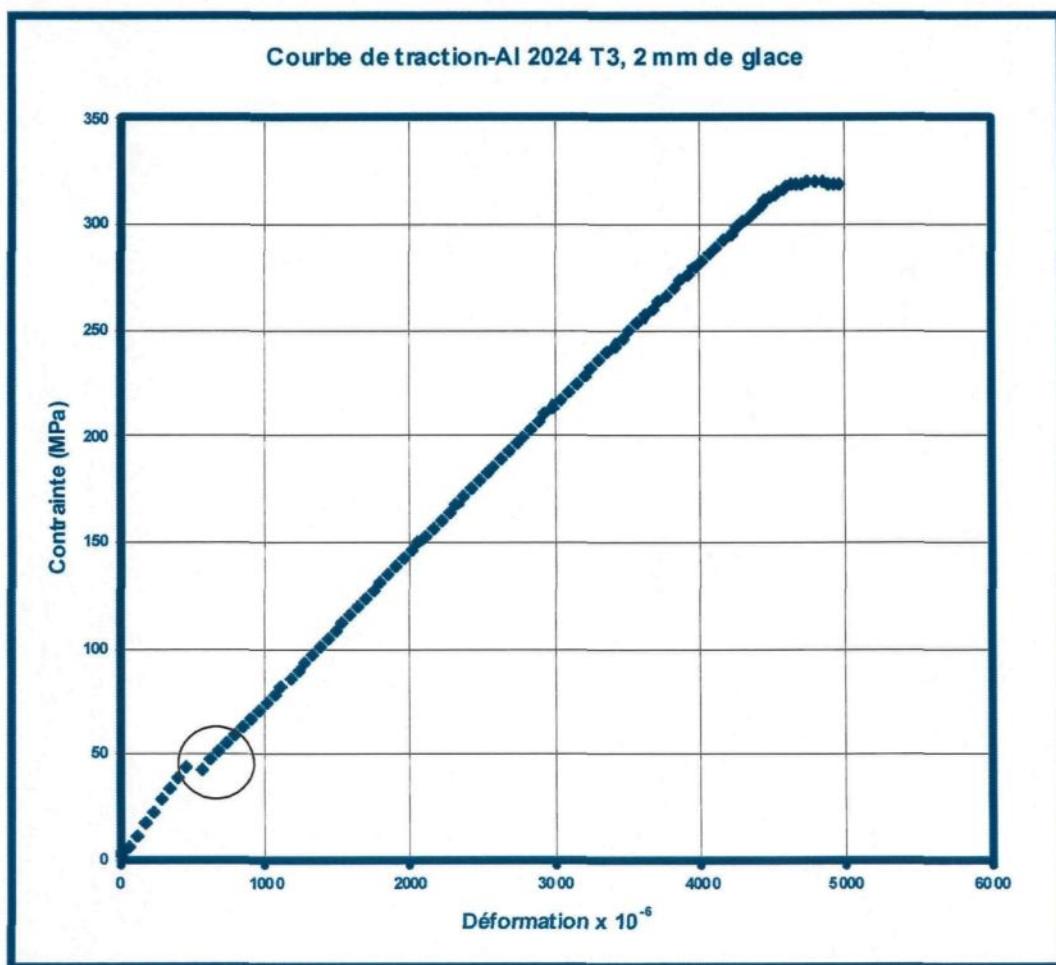


Figure 6-6 : Changement de pente brusque

6.5 L'ESSAI DE TRACTION GIVRÉ

Vingt-trois (23) essais en traction givrés ont été réalisés à des taux de déformation variant de 7 à 3200 $\mu\epsilon/s$ avec des substrats de nylon et d'aluminums 3105 H14 et 2024 T3 recouverts de 3 épaisseurs de glace soit 2, 5 et 10 mm.

Le **Tableau 6-4** montre les déformations de rupture mesurées, divisées en trois principaux groupes correspondant aux trois substrats. Les essais sont classés par ordre croissant d'épaisseur de glace et du taux de déformation. Chaque ligne correspond à un essai, donc à un épisode de givrage, car seulement un échantillon a pu être givré à la fois. Les lignes grises correspondent à la moyenne des résultats des essais obtenus pour une épaisseur de glace donnée. La contrainte présentée est la contrainte normale dans la glace calculée à l'interface juste à l'instant qui précède la formation de fissures ou le décollement du dépôt de glace. La valeur inscrite au **Tableau 6-4** a été évaluée de façon simplifiée en multipliant la déformation mesurée par la jauge de déformation ϵ_{rupt} par le module d'Young de la glace considéré égal à 9,9 GPa. Le taux de déformation a été calculé à partir de l'enregistrement de la déformation mesurée par la jauge de déformation en fonction du temps avant le décollement. Il correspond donc réellement à la vitesse de déformation de l'échantillon avant la rupture de la glace.

Par exemple, dans le cas de l'essai al2m705 (en italique dans le tableau et détaillée à l'**ANNEXE 5**) avec 5 mm de glace déposés sur l'éprouvette d'aluminium, la contrainte de rupture calculée est égale à $\varepsilon_{\text{rupt.}} \times E_g = 390 \times 10^{-6} \times 9,9 \times 10^9 \text{ Pa} = 3,86 \times 10^6 \text{ Pa}$. Dans ce calcul, on fait l'hypothèse que la déformation reste la même à travers l'aluminium, ne variant pas en fonction de l'épaisseur. La déformation mesurée sur le côté non exposé à la glace est alors identique à celle sur le côté où s'est formée la glace.

Tableau 6-4 : Déformations de rupture en traction

$$T_{\text{air et glace}} = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}, \rho = 0,89 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$$

| Séries | ϵ_{glace} (mm) $\pm 0,5$ | $\epsilon_{\text{rupt.}}$ ($\mu\epsilon$) ± 30 | $^*\sigma_{\text{rupt. int. glace}}$ (MPa) ± 10 | Taux ϵ ($\mu\epsilon/\text{s}$) ± 50 |
|-------------------------------|---|---|--|--|
| AL 3105 H14 | | | | |
| alm702 | 2,0 | 430 | 4,3 | 360 |
| alm205, | 5,0 | 460 | 4,5 | 8 |
| alm705 | 5,0 | 590 | 5,8 | 324 |
| alm1005 | 5,0 | 480 | 4,8 | 2600 |
| Moy. | 5,0 | 510 \pm 70 | 5,0 \pm 0,7 | |
| alm710 | 10,0 | 470 | 4,7 | 320 |
| Moyenne AL3105 H14 | | 490 \pm 60 | 4,7 \pm 0,4 | |
| AL 2024 T3 | | | | |
| 2m7ess2 | 2,0 | 570 | 5,6 | 220 |
| 2m7ess3 | 3,31 | 570 | 5,6 | 220 |
| 2m7ess1 | 2,6 | 580 | 5,7 | 253 |
| al2m702 | 2,0 | 290 | 2,9 | 410 |
| Moy. | 2,5 \pm 0,6 | 500 \pm 140 | 5 \pm 1 | |
| al2m505 | 5,0 | 350 | 3,5 | 83 |
| 5m7ess2 | 5,6 | 400 | 4,0 | 190 |
| 5m7ess3 | 5,4 | 500 | 5,0 | 200 |
| 5m7ess11 | 6,6 | 520 | 5,2 | 220 |
| al2m705 | 5,0 | 390 | 3,9 | 340 |
| Moy. | 5,4 \pm 0,6 | 420 \pm 70 | 4,3 \pm 0,7 | |
| 10m7ess1 | 11,4 | 200 | 2,0 | 170 |
| 10m7ess3 | 9,8 | 350 | 3,5 | 250 |
| al2m710 | 10,0 | 290 | 2,9 | 340 |
| Moy. | 10,4 \pm 0,7 | 280 \pm 100 | 2,8 \pm 0,8 | |
| Moyenne Al 2024 T3 | | 370 \pm 150 | 4 \pm 2 | |

* Évaluée à l'interface et calculée en multipliant $\epsilon_{\text{rupt.}}$ par le module d'Young, E, de la glace (9,9 GPa) à $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Suite Tableau 6-4 : Déformations de rupture en traction

| Séries | ϵ_{glace} (mm) $\pm 0,5$ | $\epsilon_{\text{rupt.}}$ ($\mu\epsilon$) ± 30 | * $\sigma_{\text{rupt. int. glace}}$ (MPa) ± 10 | Taux $\dot{\epsilon}$ ($\mu\epsilon/\text{s}$) ± 50 |
|--------------------------|---|---|--|--|
| NYLON | | | | |
| nym7022 | 2,0 | 430 | 4,3 | 410 |
| nym205 | 5,0 | Courbe non linéaire | | 7 |
| nym1005 | 5,0 | Échantillon brisé trop tôt | | 1300 |
| nym1051 | 6,0 | 256 | 2,5 | 1500 |
| nym1052 | 5,0 | 326 | 3,2 | 3200 |
| Moy. | $5,5 \pm 0,5$ | 290 ± 50 | $2,9 \pm 0,5$ | |
| nym710 | 10,0 | 19 | 0,19 | 160 |
| Moyenne NYLON | | 246 ± 209 | $2,5 \pm 2,0$ | |

*Évaluée à l'interface et calculée en multipliant $\epsilon_{\text{rupt.}}$ par le module d'Young, E, de la glace (9,9 GPa) à -10°C .

6.5.1 Composite Al 3105 H14/glace

Dans les cinq (5) essais de traction givrés effectués avec l'aluminium 3105 H15, la déformation nécessaire au bris de la glace est en moyenne de $490 \pm 60 \mu\epsilon$ ou 0,05%. Cette valeur apparaît ici être indépendante de l'épaisseur de glace et du taux de déformation. La contrainte moyenne calculée à l'interface correspondante à cette déformation vaut $4,8 \pm 0,6$ MPa. En raison du nombre limité d'essais complétés, aucunes relations d'influence avec l'épaisseur de glace et la vitesse de déformation ne peuvent être déterminées à partir de ces données.

6.5.2 Composite Al 2024 T3/glace

Dans les douze (12) essais de traction givrés effectués avec l'aluminium 2024 T3 recouvert de 2 à 10 mm de glace, les déformations de rupture valent en moyenne $370 \pm 150 \mu\epsilon$ sont

sensiblement comparables à celles de $490 \pm 60 \mu\epsilon$ mesurées avec l'Al 3105 H14. Toutefois, l'écart type de $150 \mu\epsilon$, équivalent à un coefficient de variation de 36 %, indique une variation plus élevée que dans les essais avec Al 3105 où le coefficient de variation est de à 12%. Ce fort écart serait explicable par le fait que la déformation diminue légèrement à mesure que l'épaisseur de la glace augmente. En effet, la déformation de rupture à tendance à diminuer lorsque l'épaisseur de glace augmente selon une relation de faible linéarité possédant un coefficient de corrélation de 0,4. Pour sa part, la contrainte, calculée directement à partir des valeurs de déformation, aurait également tendance à diminuer lorsque l'épaisseur de glace augmente. Enfin, sur la base des données des essais de traction givrés, le taux de déformation ne semble exercer aucun effet sur les déformations de rupture dans l'intervalle des taux de déformation étudiés compris entre 83 et $410 \mu\epsilon/s$.

6.5.3 Composite Nylon/glace

En générale, les courbes obtenues avec le nylon sont plus difficiles à analyser que celles obtenues avec l'aluminium. La rupture de l'échantillon se produit très tôt dans la courbe rendant l'analyse difficile et moins précise. Parmi les essais effectués, seulement 4 ont pu être compilés. Les quatre (4) essais montrent qu'une traction produisant une déformation moyenne de $246 \pm 209 \mu\epsilon$ est suffisante pour provoquer le bris de l'échantillon. Comme pour l'aluminium 2024 T3, la déformation de rupture apparaît dépendante de l'épaisseur de la couche de glace de l'échantillon. En effet, la déformation de rupture diminue lorsque l'épaisseur de glace sur le substrat augmente.

Les valeurs moyennes des déformations de rupture mesurées avec les deux aluminiums sont respectivement de $490 \pm 60 \mu\epsilon$ et de $390 \pm 150 \mu\epsilon$, tandis que celles obtenues avec le substrat de nylon sont de $246 \pm 209 \mu\epsilon$. Sur la base de ces valeurs moyennes, la déformation requise en traction pour briser la glace sur un échantillon de nylon serait de 2 à 1,5 fois plus faible que celles nécessaires avec des échantillons d'Al. Cette diminution apparaît toutefois peu significative si on considère les écarts-types de 60 et 150 $\mu\epsilon$ obtenus avec les deux aluminiums. La déformation de rupture mesurée avec l'aluminium 2024 T3 et le nylon glacé semble être influencée par l'épaisseur de glace.

6.6 L'ESSAI DE TORSION GIVRÉ

Quatre-vingt-onze (91) essais en torsion givrés ont été réalisés avec 3 épaisseurs ciblées de glace soit 2, 5 et 10 mm à des taux de déformation variant de 7 à 3200 $\mu\epsilon/s$ avec des tubes échantillons de nylon (37 essais) et d'aluminium 2024 T3 (54 essais). Dans les essais de torsions givrés, le cisaillement de rupture a été déterminé de la même manière que dans les essais de traction, c'est-à-dire au point du changement soudain ou graduel observé sur les enregistrements du cisaillement et du couple exercé sur le tube et de la courbe du couple en fonction du cisaillement. Des exemples tirés d'un essai effectué le 2 mai 2005 avec 5 mm de glace sur un tube d'aluminium sont présentés aux **Figure 6-7** et **Figure 6-8**. Ces deux courbes sont détaillées à l'**ANNEXE 3**. Sur ces deux courbes, la déformation de rupture est observée à environ $300 \mu\gamma$ à un couple d'environ 6 N.m.

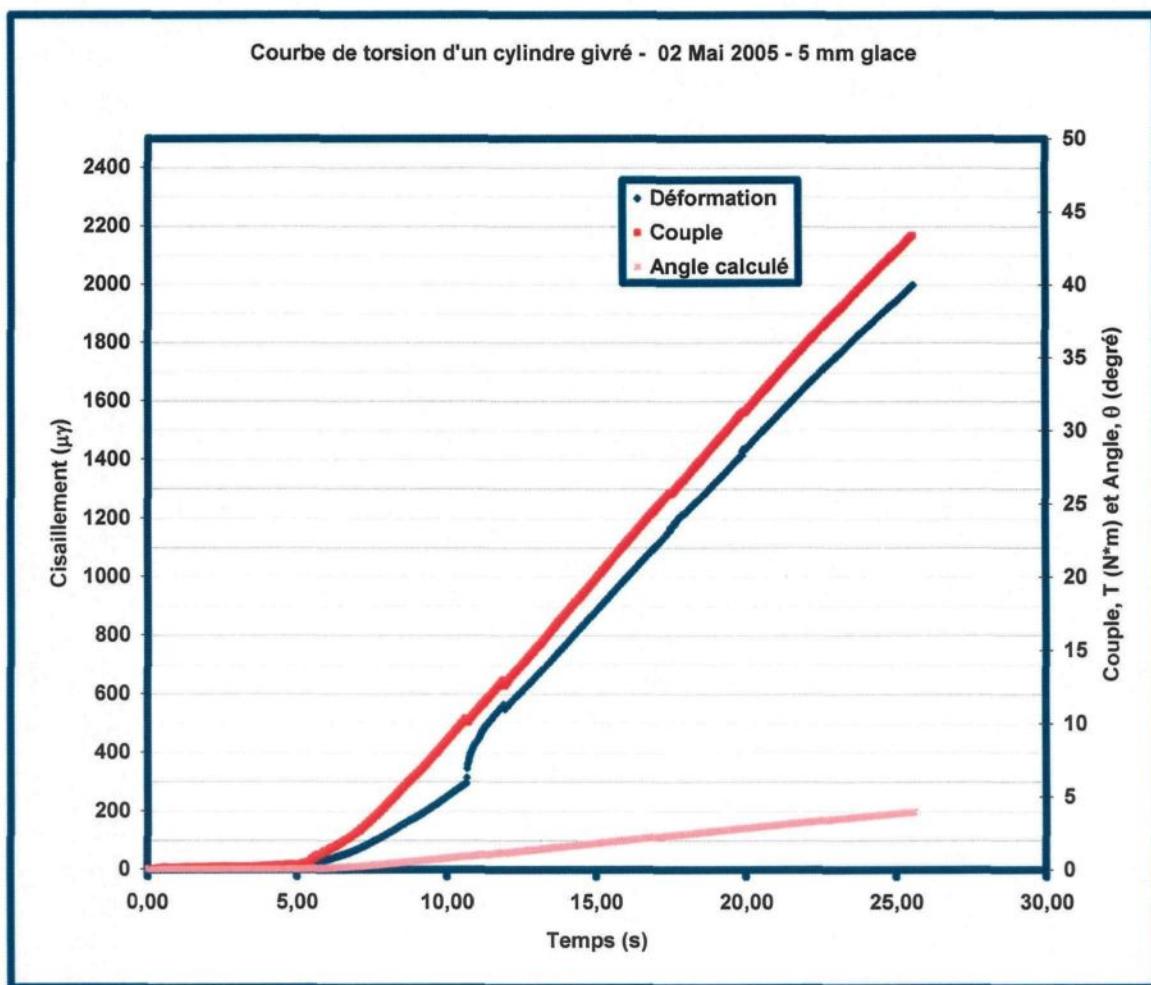


Figure 6-7 : Courbe obtenue à partir de l'enregistrement en fonction du temps du cisaillement à l'interface givré et du couple exercé sur le tube

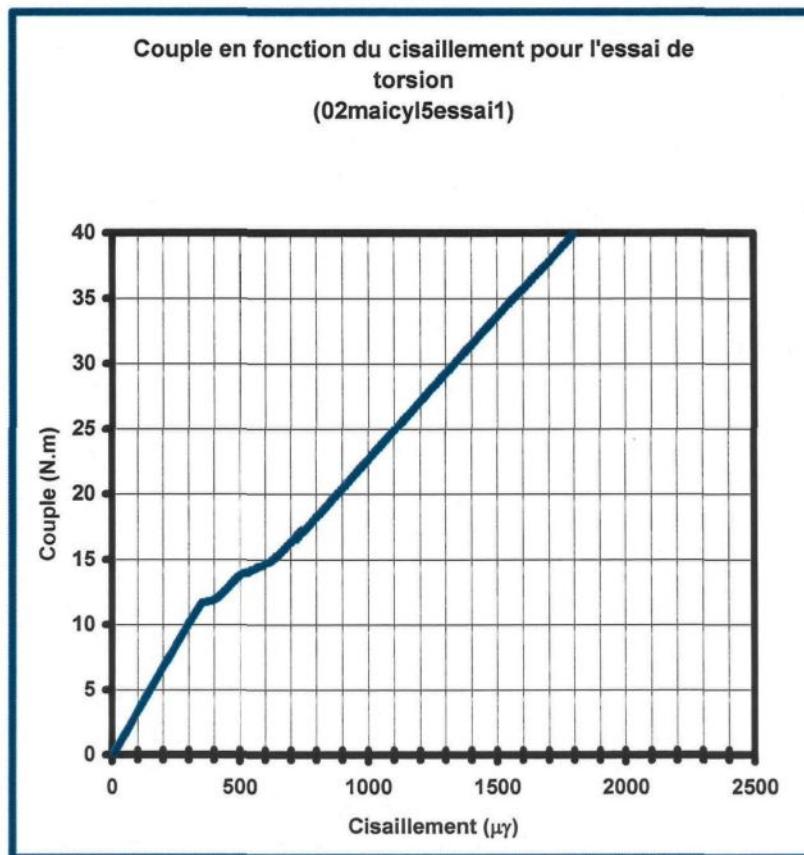


Figure 6-8 : Courbe du couple en fonction du cisaillement

La déformation et la contrainte en cisaillement calculées au moment du bris de la glace ont été tabulées en fonction de l'épaisseur de glace et du taux de déformation. Les données présentées du **Tableau 6-5** sont celles obtenues avec les tubes échantillons d'aluminium 2024 T3 tandis que celles du **Tableau 6-6** correspondent aux essais avec le nylon.

Tableau 6-5 : Déformations de rupture des dépôts de glace en torsion sur l'Al 2024 T3

$$T_{\text{air et glace}} = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}, \rho = 0,89 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$$

| Séries/nbr. échantillons | e_{glace} (mm) \pm écart-type | $\gamma_{\text{rupt.}}$ ($\mu\gamma$) \pm écart-type | $^*\tau_{\text{rupt. int. glace}}$ (MPa) \pm écart-type | Taux γ ($\mu\gamma/\text{s}$) \pm écart-type |
|-----------------------------|--|--|---|---|
| 28avrilessai1/1 | 2,2 | 930 | 2,8 | 12 |
| 29avrilessai1/1 | 2,3 | 1090 | 3,3 | 36 |
| 15avrilessai1/3 | 2,2 \pm 0,1 | 600 \pm 200 | 2,2 \pm 0,6 | 39 \pm 13 |
| 27avrilessai1/3 | 2,1 \pm 0,1 | 700 \pm 40 | 2,5 \pm 0,1 | 44 \pm 6 |
| 18avrilessai1/1 | 2,3 | 620 | 1,7 | 45 |
| 13avrilessai1/3 | 1,8 \pm 0,2 | 670 \pm 130 | 2,5 \pm 0,5 | 86 \pm 20 |
| 11avrilessai1/3 | 2,0 \pm 0,1 | 620 \pm 120 | 1,9 \pm 0,3 | 276 |
| Moy. | 2,1 \pm 0,2 | 700 \pm 180 | 2,3 \pm 0,9 | |
| 9maiessai1/2 | 5,3 \pm 0,1 | 210 \pm 10 | 0,60 \pm 0,03 | 6 \pm 2 |
| 26maiessai1/2 | 6,2 \pm 0,1 | 310 \pm 20 | 0,78 \pm 0,04 | 8 \pm 1 |
| 25maiessai1/2 | 5,4 \pm 0,1 | 300 \pm 20 | 0,86 \pm 0,01 | 8 \pm 1 |
| 4maiessai1/2 | 5,4 \pm 0,2 | 350 \pm 30 | 1,03 \pm 0,01 | 31 \pm 3 |
| 3maiessai1/3 | 5,1 \pm 0,2 | 400 \pm 10 | 1,2 \pm 0,04 | 32 \pm 2 |
| 2maiessai1/3 | 5 \pm 1 | 350 \pm 50 | 1,1 \pm 0,3 | 47 \pm 21 |
| 2maiessai2/3 | 5,0 \pm 0,1 | 390 \pm 90 | 1,2 \pm 0,1 | 59 \pm 11 |
| 30marsessai1/2 | 4 \pm 1 | 470 \pm 230 | 1,5 \pm 0,7 | 74 \pm 23 |
| Moy. | 5,1 \pm 0,7 | 350 \pm 80 | 1,0 \pm 0,3 | |
| 5avrilessai1/3 | 10,1 \pm 0,5 | 220 \pm 30 | 0,45 \pm 0,08 | 18 \pm 1 |
| 6avrilessai1/3 | 10,1 \pm 0,6 | 200 \pm 30 | 0,44 \pm 0,07 | 18 \pm 2 |
| 8avrilessai1/1 | 10,6 | 170 | 0,24 | 20 |
| 1avrilessai1/2 | 9,9 \pm 0,5 | 230 \pm 30 | 0,52 \pm 0,04 | 32 \pm 1 |
| 4avrilessai1/3 | 9,4 \pm 0,4 | 220 \pm 10 | 0,55 \pm 0,05 | 36 \pm 1 |
| Moy. | 10,0 \pm 0,4 | 210 \pm 20 | 0,4 \pm 0,1 | |

* Calculé à partir du couple mesuré un peu avant ou au moment de la rupture

Tableau 6-6 : Déformations de rupture des dépôts de glace en torsion sur le NYLON

$$T_{\text{air et glace}} = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}, \rho = 0,89 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$$

| Séries/nbr. Échantillons | e_{glace} (mm) ± écart-type | $\gamma_{\text{rupt.}}$ ($\mu\gamma$) ± écart-type | $^*\tau_{\text{rupt. int. glace}}$ (MPa) ± écart-type | Taux γ ($\mu\gamma/\text{s}$) ± écart-type |
|-----------------------------|--|--|---|---|
| 22juinessai1/2 | $2,4 \pm 0,1$ | 320 ± 50 | $0,46 \pm 0,01$ | 7 ± 3 |
| 22juinessai2/3 | $2,0 \pm 0,2$ | 420 ± 90 | $0,74 \pm 0,2$ | 9 ± 2 |
| 10juinessai1/3 | $2,4 \pm 0,1$ | 400 ± 20 | $0,80 \pm 0,05$ | 27 ± 1 |
| 27maiessai1/2 | $2,8 \pm 0,1$ | 180 ± 4 | $0,6 \pm 0,1$ | 27 ± 2 |
| 27maiessai2/3 | $2,8 \pm 0,2$ | 250 ± 40 | $0,6 \pm 0,4$ | 31 ± 8 |
| 1juinessai1/3 | $3,0 \pm 0,1$ | 400 ± 80 | $0,42 \pm 0,06$ | 40 ± 20 |
| Moy. | $2,6 \pm 0,4$ | 330 ± 100 | $0,6 \pm 0,2$ | |
| 25maiessai1/1 | 5,4 | 100 | 0,23 | 2 |
| 9juinessai1/2 | $4,5 \pm 0,3$ | 150 ± 30 | $0,33 \pm 0,06$ | 5 ± 6 |
| 2juinessai1/3 | $5,1 \pm 0,5$ | 230 ± 40 | $0,4 \pm 0,1$ | 12 ± 2 |
| 31maiessai1/3 | $5,1 \pm 0,2$ | 190 ± 40 | $0,35 \pm 0,09$ | 18 ± 4 |
| 1juinessai1/2 | $4,9 \pm 0,5$ | 250 ± 70 | $0,5 \pm 0,1$ | 24 ± 5 |
| 26maiessai1/1 | 6 | 190 | 0,40 | 29 |
| Moy. | $5,2 \pm 0,5$ | 190 ± 50 | $0,4 \pm 0,1$ | |
| 28juinessai1/3 | $9,8 \pm 0,3$ | 70 ± 30 | $0,13 \pm 0,03$ | 1 ± 1 |
| 21juinessai1/2 | $10,4 \pm 0,5$ | 90 ± 10 | $0,14 \pm 0,01$ | 2 ± 1 |
| 7juin essai1/3 | $8,3 \pm 0,8$ | 90 ± 20 | $0,16 \pm 0,04$ | 44 ± 66 |
| Moy. | $9,5 \pm 1,1$ | 80 ± 10 | $0,14 \pm 0,03$ | |

* Calculé à partir du couple mesuré un peu avant ou au moment de la rupture

Chaque ligne des tableaux correspond à la valeur moyenne des résultats obtenus dans une série d'essais. Une série d'essais comprend de 1 à 3 tubes échantillons recouverts sensiblement de la même épaisseur de glace et déformés au même taux. Les lignes grises sont la moyenne avec écart type des valeurs obtenues à une épaisseur donnée pour toutes les séries effectuées à différents taux de déformation.

La première colonne des tableaux donne le label de la série d'essais avec le nombre d'échantillons en jeu. La seconde colonne présente l'épaisseur moyenne de la glace déposée sur les échantillons. La troisième colonne est la valeur moyenne, avec écart type, des cisaillements de rupture, $\gamma_{rupt.}$ exprimée en $\mu\epsilon$, de la glace sur les tubes échantillons de la série d'essais. La valeur du cisaillement est celle mesurée par la jauge de déformation collée sur la surface extérieure du cylindre sous le dépôt de glace. Il s'agit donc d'une valeur mesurée, non calculée. La cinquième colonne présente le taux de déformation de la série d'essais. Ce dernier a été déterminé à partir de la pente de la courbe de la déformation en fonction du temps calculé avant le bris de la glace.

La quatrième colonne présente la contrainte en cisaillement dans la glace $\tau_{rupt. int. glace}$ associée à la déformation de rupture. Cette contrainte est le cisaillement évalué à l'interface glace/substrat à partir du couple mesuré juste avant le bris en utilisant les **équations déjà présentées au Tableau 4-4.**

Prenons comme exemple l'essai effectué le 2 mai 2005 avec le cylindre en Al (en italique dans le **Tableau 6-5**) de $0,01567\text{ m}$ de diamètre intérieur et de $0,01910\text{ m}$ de diamètre extérieur (G vaut $29 \times 10^9\text{ Pa}$) recouvert de $0,005\text{ m}$ de glace. Lors de cet essai, le couple mesuré au moment du bris du dépôt de glace est de $12,1\text{ Nm}$. Le cisaillement lors de la rupture à l'interface, $\tau_{\text{rupt. int. glace}}$ qui est égal au produit du couple dans la glace et du rayon à l'interface divisé par le second moment polaire de glace, J_g , vaut $1,14 \times 10^6\text{ Pa}$. Ce calcul est détaillé à l'**ANNEXE 6**.

6.6.1 Composite aluminium/glace

Les cinquante-quatre (54) essais effectués avec un substrat d'aluminium 2024 T3 montrent que le cisaillement nécessaire au bris de la glace sur l'échantillon composite aluminium/glace est en moyenne de $430 \pm 270\text{ }\mu\epsilon$, correspondant à un pourcentage de déformation de $0,043 \pm 0,027\text{ %}$. La contrainte moyenne dans la glace à l'interface à ce niveau de cisaillement, telle qu'évaluée selon les équations utilisées dans l'exemple précédent, vaut $1,3 \pm 0,8\text{ MPa}$.

Dans les essais en torsion givrés avec l'aluminium, on n'a pas observé d'influence de la vitesse de déformation sur les cisaillements de rupture. L'effet de l'épaisseur de la couche de glace sera discuté au **chapitre 7**.

6.6.2 Composite nylon/glace

Les trente-sept (37) essais effectués avec un substrat de nylon montrent que le cisaillement nécessaire au bris de la glace sur le tube de nylon vaut en moyenne $200 \pm 130\text{ }\mu\epsilon$. Cette valeur correspond à un pourcentage de déformation moyen de $0,020 \pm 0,013\text{ %}$ de déformation. Pour sa part, la contrainte en cisaillement à l'interface glace/substrat associée à cette déformation vaut $0,4 \pm 0,2\text{ MPa}$. Comme pour l'aluminium, le taux de déformation ne semble pas

influencer les déformations mesurées. Par contre, l'épaisseur de la couche de glace exerce une influence et sera discutée au chapitre 7.

6.6.3 Torsion d'un câble toronné glacé

Un segment d'un câble toronné en Al de 2 cm de diamètre recouvert de 5 mm de glace (**Figure 6-9**) a été soumis à une torsion afin de voir si et comment le décollement de la glace différait de celui observé avec le tube. Étant donné la configuration en toron du câble, le câble n'a pas pu être doté d'une jauge de déformation. Pour cette raison, seules des observations visuelles ont pu être effectuées à partir des vidéos et de photos. Sur cette surface toronnée, la glace se forme en lobes individuels, en ce sens que la glace s'accumule séparément sur chaque brin. Lorsque le câble est tourné (dans le sens où les brins sont resserrés) à vitesse maximum du montage de $100 \mu\text{y/s}$, la glace décolle après une torsion d'à peine quelques degrés, sous forme de languettes sur la totalité de la surface du câble (**Figure 6-10**). Pour 5 mm de glace, le couple à la rupture est d'environ 15 Nm pour un angle de rotation d'environ $1,5^\circ$. Pour des cylindres d'Al tels qu'utilisés lors des essais, le couple à la rupture reste sensiblement le même c'est-à-dire environ 14 Nm mais pour une rotation plus grande de $7,5^\circ$. L'utilisation d'un câble toronné apparaît donc avantageuse comparativement à un tube en raison premièrement de la forme en languettes du dépôt (favorisant le déglaçage complet du câble même s'il est cylindrique) et deuxièmement, de l'angle de rotation beaucoup plus faible nécessaire à son déglaçage.



Figure 6-9: Câble toronné d'Al givré

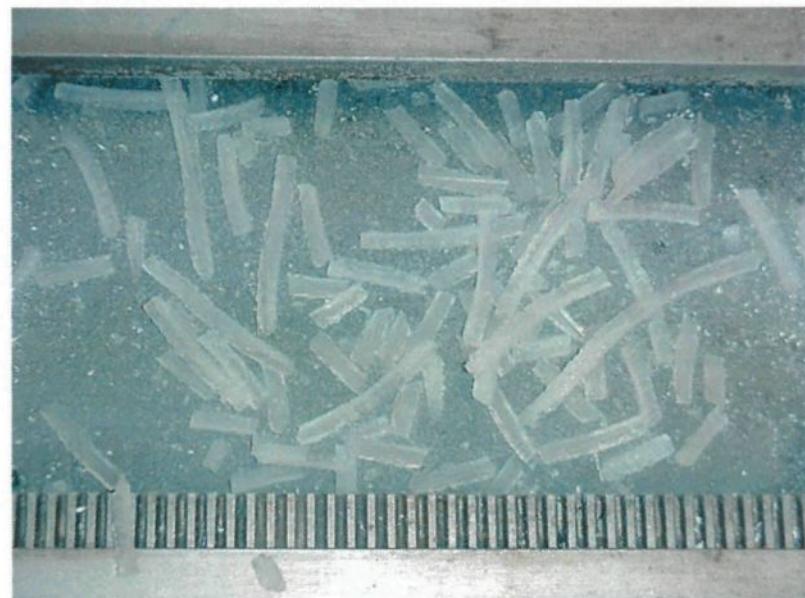


Figure 6-10: Languettes de glace détachées lors de la torsion du câble toronné

6.7 L'ESSAI DE FLEXION GIVRÉ

Soixante (60) essais de flexion givrés ont été réalisés avec des lames de nylon (35 essais) et d'aluminium 2024 T3 (25 essais) à différents taux de déformation et avec des épaisseurs de glace variant de 2 à 10 mm. La déformation de rupture, $\varepsilon_{rupt.}$, déterminée de la même façon qu'en traction et torsion, a été tabulée en fonction de l'épaisseur de glace et du taux de déformation. Le **Tableau 6-7** présente ces résultats en deux sections, l'une pour l'aluminium 2024 T3 et l'autre pour le nylon. Chaque ligne correspond à la valeur moyenne des résultats obtenus dans une série d'essais. Chaque série d'essais comprend de 2 à 5 lames échantillons recouvertes d'une même épaisseur de glace, toutes fléchies au même taux de déformation. La trame grise identifie la valeur moyenne avec l'écart type des données prises dans chaque série d'essais à une épaisseur donnée.

La première colonne des tableaux donne le libellé de la série avec le nombre d'échantillons considérés dans la moyenne. La seconde colonne présente l'épaisseur moyenne de glace des échantillons de la série. La troisième colonne est la moyenne avec écart-type des déformations de rupture, $\varepsilon_{rupt.}$, exprimée en micro déformation. La sixième colonne présente le taux de déformation de la série d'essais déterminé à partir de la pente de la courbe déformation en fonction du temps calculé avant le bris de l'échantillon. La quatrième et la cinquième colonne présentent les contraintes associées à la déformation, soit la contrainte normale et la contrainte en cisaillement évaluée en MPa. Ces contraintes sont celles s'exerçant dans la glace à l'interface au moment du bris, ces dernières étant calculées à partir de la force appliquée en utilisant les équations présentées dans le **Tableau 4-6**.

Tableau 6-7 : Déformation de rupture de glace en flexion

$$T_{\text{air et glace}} = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}, \rho = 0,89 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$$

| Séries/nbr. éch. | ϵ_{glace} (mm) ± écart-type | $\epsilon_{\text{rupt.}}$ ($\mu\epsilon$) ± écart-type | $^*\sigma_{\text{rupt. int. glace}}$ (MPa) ± écart-type | $^{\dagger}\tau_{\text{rupt. int. glace}}$ (MPa) ± écart-type | Taux ϵ ($\mu\epsilon/\text{s}$) ± écart-type |
|-------------------|---|--|---|---|---|
| AL 2024 T3 | | | | | |
| 15sepAM/3 | $2,9 \pm 0,4$ | 50 ± 20 | $-0,12 \pm 0,03$ | $0,010 \pm 0,004$ | 160 ± 100 |
| 15sepPM/3 | $2,7 \pm 0,2$ | 80 ± 10 | $-0,28 \pm 0,08$ | $0,019 \pm 0,001$ | 360 ± 120 |
| 19sepPM/3 | $2,6 \pm 0,2$ | 110 ± 20 | $-0,36 \pm 0,11$ | $0,022 \pm 0,004$ | 470 ± 10 |
| Moy. | $2,7 \pm 0,2$ | 80 ± 30 | $-0,24 \pm 0,12$ | $0,017 \pm 0,006$ | |
| 20sepPM/3 | $5,4 \pm 0,1$ | 30 ± 5 | $0,005 \pm 0,003$ | $0,012 \pm 0,002$ | 350 ± 140 |
| 7sep/3 | $6,4 \pm 0,1$ | 30 ± 5 | $0,020 \pm 0,003$ | $0,007 \pm 0,001$ | 350 ± 270 |
| 20sepAM/3 | $4,9 \pm 0,5$ | 40 ± 10 | $-0,02 \pm 0,03$ | $0,017 \pm 0,006$ | 1150 ± 730 |
| Moy. | $5,6 \pm 0,8$ | 30 ± 10 | $0,002 \pm 0,020$ | $0,010 \pm 0,008$ | |
| 19sepAM/2 | $9,3 \pm 0,2$ | 10 ± 5 | $0,042 \pm 0,005$ | $0,0085 \pm 0,0007$ | 130 ± 10 |
| 16sep/2 | $7,8 \pm 0,2$ | 17 ± 0 | $0,042 \pm 0,002$ | $0,011 \pm 0$ | 130 ± 40 |
| 21sep/3 | $10,0 \pm 0,2$ | 30 ± 5 | $0,10 \pm 0,01$ | $0,019 \pm 0,003$ | 260 ± 90 |
| Moy. | 9 ± 1 | 20 ± 10 | $0,07 \pm 0,03$ | $0,013 \pm 0,006$ | |
| NYLON | | | | | |
| 15sepAM/5 | $2,7 \pm 0,2$ | 350 ± 30 | $-1,4 \pm 0,2$ | $0,042 \pm 0,005$ | 1760 ± 50 |
| 15sepPM/5 | $2,7 \pm 0,2$ | 360 ± 20 | $-1,4 \pm 0,1$ | $0,041 \pm 0,002$ | 3040 ± 120 |
| 19sepPM/4 | $2,6 \pm 0,2$ | 480 ± 20 | $-2,0 \pm 0,3$ | $0,055 \pm 0,006$ | 4420 ± 320 |
| Moy. | $2,7 \pm 0,1$ | 400 ± 70 | $-1,6 \pm 0,3$ | $0,046 \pm 0,008$ | |
| 7sep/4 | $5,6 \pm 0,6$ | 210 ± 20 | $-0,3 \pm 0,1$ | $0,05 \pm 0,01$ | 1640 ± 130 |
| 20sepAM/4 | $5,4 \pm 0,2$ | 310 ± 10 | $-0,46 \pm 0,06$ | $0,067 \pm 0,006$ | 3060 ± 130 |
| 20sepPM/4 | $5,3 \pm 0,1$ | 390 ± 40 | $-0,66 \pm 0,04$ | $0,091 \pm 0,006$ | 4080 ± 160 |
| Moy. | $5,4 \pm 0,2$ | 300 ± 90 | $-0,5 \pm 0,2$ | $0,07 \pm 0,02$ | |
| 19sepAM/5 | $9,9 \pm 0,3$ | 270 ± 30 | $0,20 \pm 0,02$ | $0,052 \pm 0,007$ | 2260 ± 390 |
| 21sep/4 | $10,2 \pm 0,2$ | 270 ± 30 | $0,22 \pm 0,02$ | $0,050 \pm 0,005$ | 2480 ± 150 |
| Moy. | 9 ± 2 | 290 ± 40 | $0,21 \pm 0,02$ | $0,054 \pm 0,005$ | |

* Calculée à partir de la charge (kg) mesurée à la rupture de la glace

† Calculée à partir de la charge (kg) mesurée à la rupture de la glace

Pour illustrer les calculs, prenons comme exemple un essai compris dans la série du 20 septembre 2005 avec la poutrelle d'aluminium numéro 3 ($E_{al} = 71 \text{ GPa}$) recouverte de 5 mm de glace (en italique dans le tableau). Les enregistrements de la déformation et de la force appliquée en fonction de temps sont présentés à la **Figure 6-11**. Le bris de l'échantillon est observé lorsque la déformation atteint environ $40 \mu\text{e}$. La force mesurée à cet instant vaut 1,6 N équivalent à un moment de flexion ($M = P \times l_{glacé}/2$) de $0,203 \text{ Nm}$. La contrainte normale à l'interface de glace $\sigma_{rupt. int. glace}$ vaut :

$$\sigma_{rupt. int. glace} = (-M (e_{al} - y_c) n) / I = -6,545 \times 10^3 \text{ Pa} \quad \text{Équation 6-1}$$

où M = moment de flexion exercé sur la poutre glacée ($0,203 \text{ Nm}$)
 e_{al} = épaisseur de la lame d'Al ($0,00197 \text{ m}$)
 y_c = position de l'axe neutre de la poutre glacée ($0,00192 \text{ m}$)
 $n = E_{glace} / E_{al} = 0,139$
 I = moment d'inertie de la poutre glacée ($2,168 \times 10^{-10} \text{ m}^4$)

Tenant compte des valeurs dans l'essai choisi, la contrainte calculée à l'interface en compression vaut $-6,545 \times 10^3 \text{ Pa}$.

Pour sa part, le cisaillement à l'interface $\tau_{rupt. int. glace}$ est égal à :

$$\tau_{rupt. int. glace} = P Q n / I b_g = 1,359 \times 10^4 \text{ Pa} \quad \text{Équation 6-2}$$

où P = force appliquée ($1,60 \text{ N}$)
 Q = moment statique avec 5 mm de glace ($4,605 \times 10^{-8} \text{ m}^3$)
 b_g = largeur de la glace ($0,0250 \text{ m}$)
Ce calcul est détaillé à l'**ANNEXE 7**.

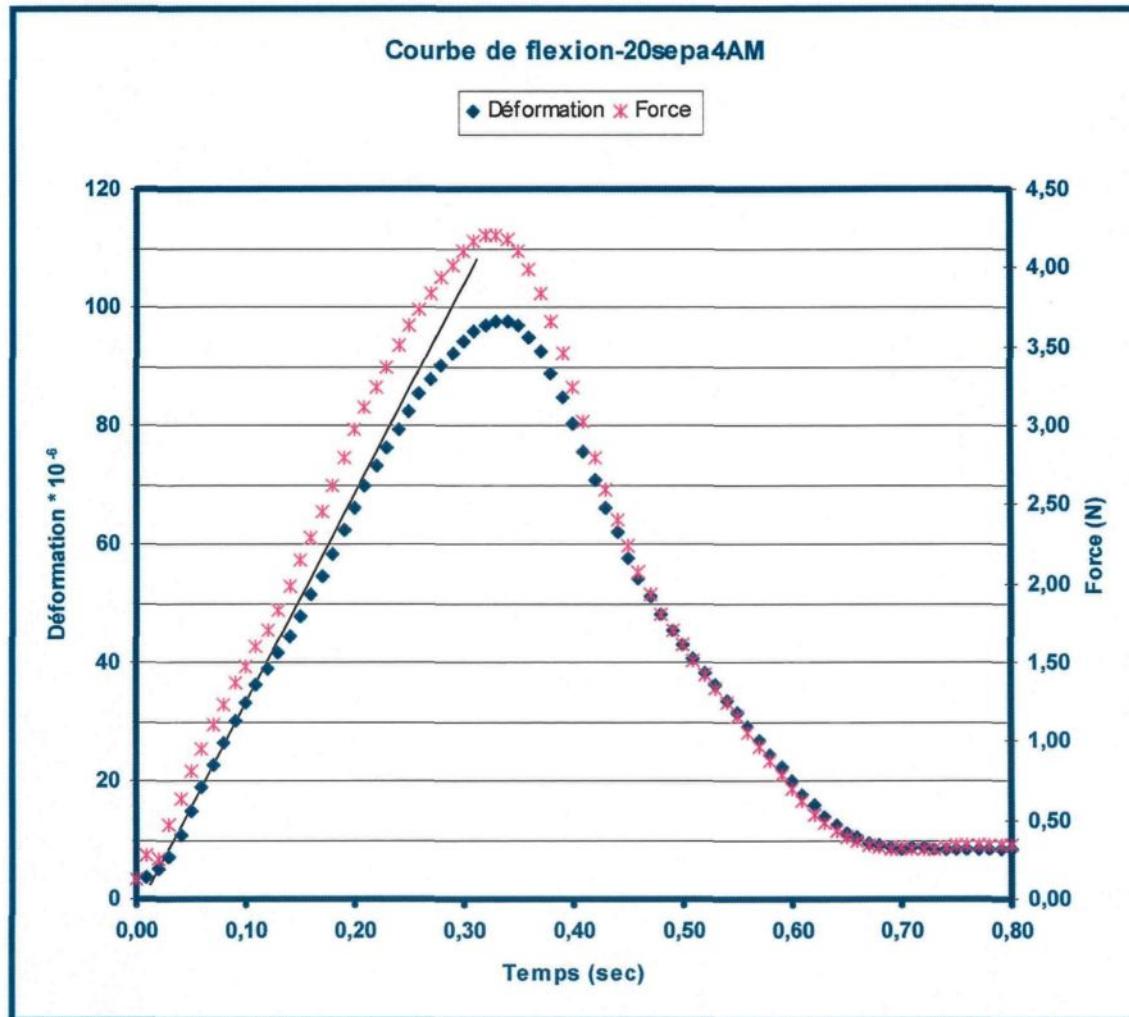


Figure 6-11 : Courbe de la déformation et de la force appliquée en fonction du temps pour l'essai de flexion givré 20sepa4AM

6.7.1 Composite Al 2024 T3/glace et Nylon/glace

En moyenne, si on considère tous les essais sans tenir compte de l'épaisseur de glace et du taux de déformation, les déformations de rupture pour l'aluminium sont de $40 \mu\epsilon \pm 75\%$, correspondant à des contraintes normales de $-0,06 \text{ MPa} \pm 250\%$ et de $0,014 \text{ MPa} \pm 36\%$ en cisaillement. Pour le nylon, la déformation moyenne augmente à $330 \mu\epsilon \pm 24\%$, correspondant à des contraintes normales de $-0,7 \text{ MPa} \pm 114\%$ et de $0,060 \text{ MPa} \pm 33\%$ en cisaillement. En flexion, la déformation de rupture est donc 5 fois plus élevée avec les échantillons de nylon comparativement aux échantillons d'aluminium. Aucun effet significatif du taux de déformation n'a été observé sur les résultats des essais de flexion givrés. L'effet de l'épaisseur de glace sera présenté dans la discussion.

6.8 EXAMEN VISUEL

6.8.1 L'essai de traction givré

Lors de la déformation en traction d'un échantillon givré, deux évènements sont observables : la fissuration de la couche de glace sur le substrat et/ou le décollement de la couche de glace sur le substrat. L'analyse visuelle permet de déterminer l'emplacement, l'inclinaison et le nombre de fissures apparaissant lors du bris de la glace en cours d'essai et d'établir un ordre chronologique des évènements. Des films vidéo à haute vitesse prenant 500 images par seconde ainsi que des photographies des échantillons brisés ont été analysés dans cette optique.

L'analyse de 6 vidéos d'essais à 500 images/s avec le substrat d'aluminium 2024 T3 givré, a permis d'identifier deux types de bris combinant la fissuration et le décollement :

1. **Cas 1 :** Décollement complet du dépôt de glace sans fissuration, **Figure 6-12** (50% des cas)
2. **Cas 2 :** Décollement partiel du dépôt de glace simultanément ou suivi d'une fissuration, **Figure 6-13** (50% des cas)

Sur la base de ces 6 cas filmés, la moitié des échantillons a subi un décollement sans fissuration et l'autre moitié a subi un décollement partiel avec fissuration. Dans les deux cas, les essais ont été considérés réussis et leurs résultats analysés. Le type de bris obtenu ne dépend ni de l'épaisseur de la couche de glace ni du taux de déformation de l'essai. Le décollement, observable par un changement de coloration de l'échantillon, est initié à une extrémité ou aux deux, d'où il progresse jusqu'au centre à des vitesses évaluées entre 2,7 et 40 cm/s selon le temps mis entre deux images.

L'amorce d'une fissure et sa propagation sur le plan normal dans la glace se produisent sur deux images du film soit dans un laps de temps maximum de 0,004 s (2 images x 1/500 s). Sur la première image, on observe la fissure formée sur toute la largeur de l'échantillon à l'interface glace/substrat. Sur le second cliché, la fissure a traversé l'épaisseur de glace et apparaît à la surface de celle-ci. Les fissures sont perpendiculaires à la surface et à l'axe de traction. Le nombre de fissures générées varie de 1 à 6, ce dernier étant indépendant de l'épaisseur de la couche de glace et de la vitesse de l'essai. La fissuration de la glace sur un plan normal et perpendiculaire à l'axe de traction ainsi que son caractère aléatoire sont caractéristiques d'un comportement fragile. L'amorce du bris soit le décollement ou l'apparition de fissures se produit généralement à une ou simultanément aux deux extrémités de l'échantillon. Les

extrémités présentent généralement un plus grand nombre de fissures. L'amorçage aux extrémités serait attribuable à la diminution de l'épaisseur de glace occasionnant une contrainte plus élevée.

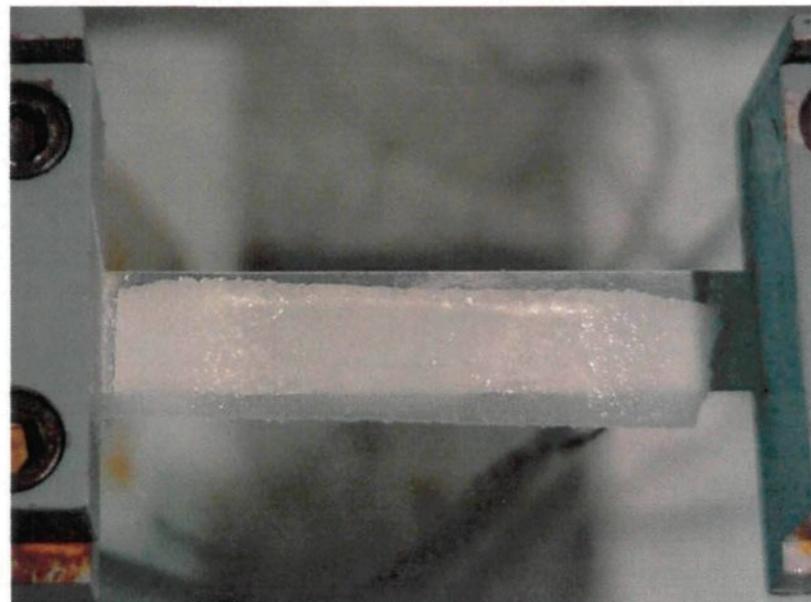


Figure 6-12 : Cas 1 : Décollement sans fissuration (50% des essais filmés)

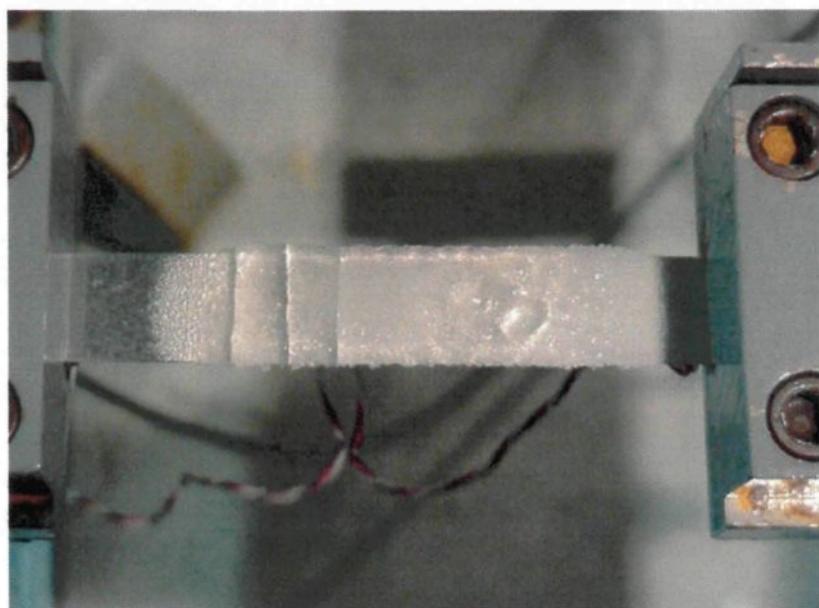


Figure 6-13 : Cas 2 : Décollement partiel avec fissuration (50% des essais filmés)

6.8.2 L'essai de torsion givré

Quatre-vingt-trois (83) essais de torsion givrés ont été filmés, quarante-six (46) avec des tubes d'aluminium 2024 T3 et trente-sept (37) avec des tubes de nylon, les deux glacés de 2 et 10 mm d'épaisseur. Dans chaque essai, les échantillons ont été filmés de façon conventionnelle (30 images/s) et photographiés après le bris du dépôt de glace. Comme pour la traction, la déformation en torsion d'un cylindre givré provoque deux événements soit, la fissuration de la couche de glace et/ou son décollement à l'interface. Voici les trois cas observés lors des essais :

1. **Cas 1 (Figure 6-14):** Début de fissuration de la glace avec décollement partiel à une extrémité. La fissuration et le décollement se produisent sur le même cliché donc dans un laps de temps inférieur à 0,03 s soit le temps d'enregistrement de l'image vidéo. Une fois amorcé, le décollement de la glace progresse d'une extrémité à l'autre suivie par une fissure sur toute la longueur de l'échantillon. (**70 % des cas**)
2. **Cas 2 :** La fissuration et le décollement sont observés sur toute la longueur du tube échantillon sur le même cliché vidéo, donc dans un laps de temps inférieur à 1/30 ou 0,03 s. (**24 % cas**)
3. **Cas 3 (Figure 6-15):** Le front de décollement, initié à une ou aux deux extrémités, progresse sur tout l'échantillon sans fissuration. Ce cas est observé uniquement avec les tubes de nylon. (**6% des cas dont 100% avec le nylon**)

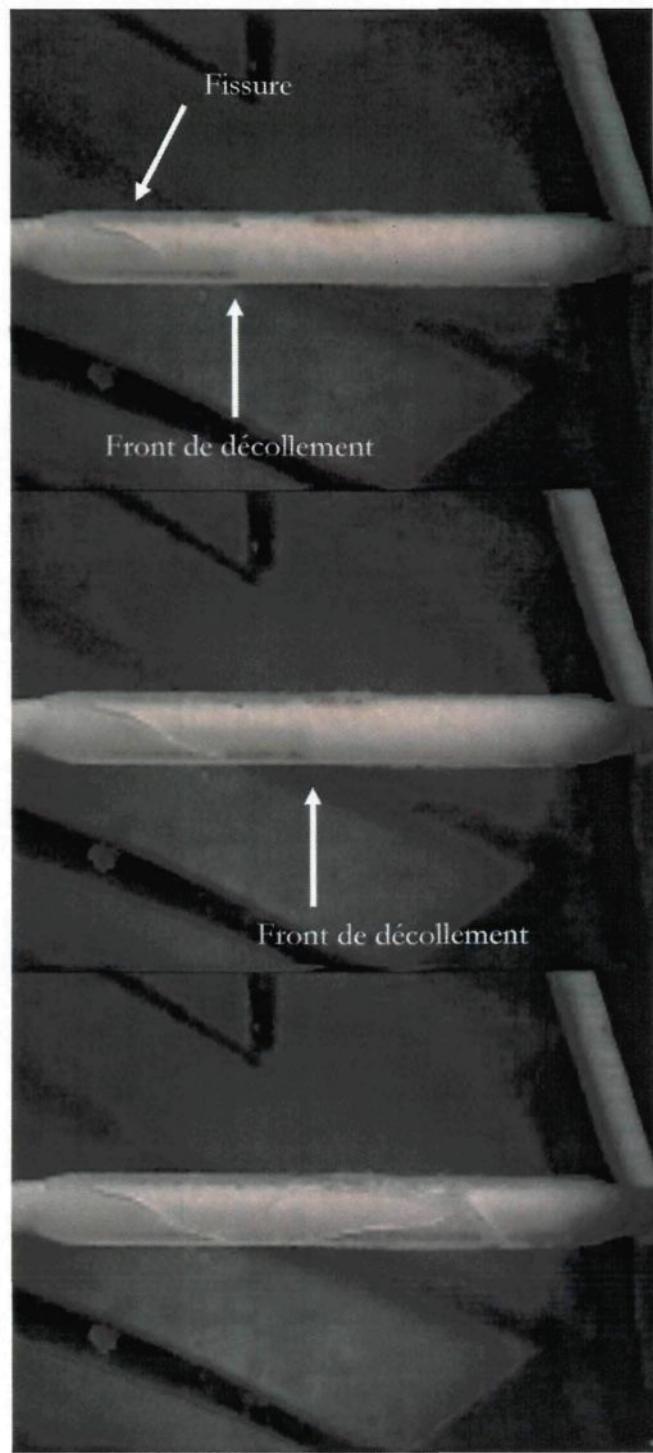


Figure 6-14 : Bris observé en torsion dans 70% des cas (Cas 1)

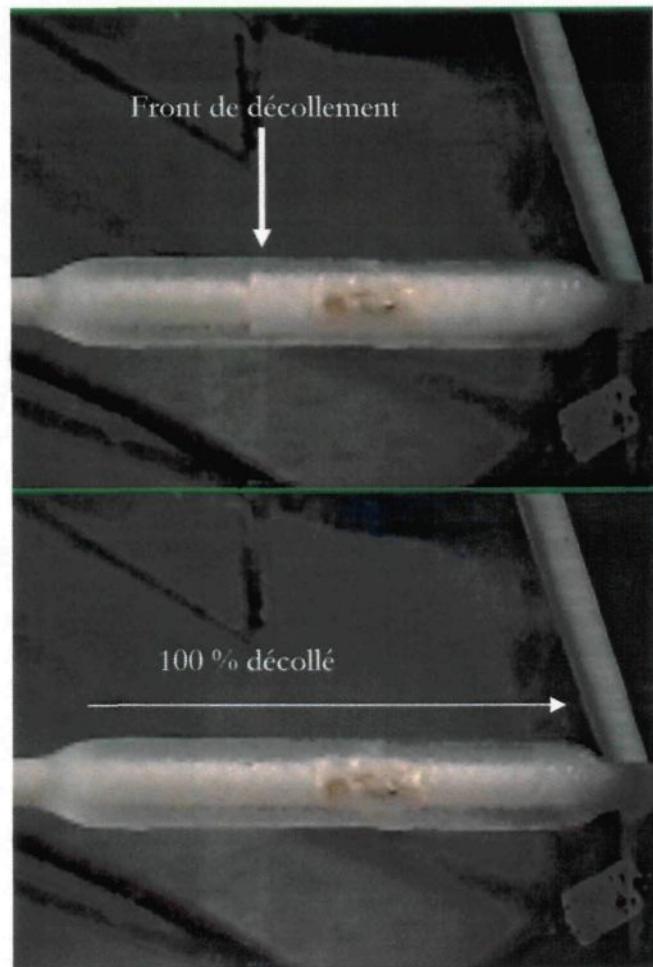


Figure 6-15 : Décollement observé en torsion dans 29% des cas (cas 3)

Les fissures produites font un angle 45° par rapport à l'axe de torsion ce qui est caractéristique d'une rupture fragile en torsion. La **Figure 6-16** illustre le type de fissures obtenues.



Figure 6-16 : Échantillon brisé par torsion (Al 2024 T3) produisant une fissuration à 45° sur l'axe de torsion

6.8.3 L'essai de flexion givré

Soixante (60) essais en flexion givrés ont été complétés, vingt-cinq (25) avec des lames d'aluminium 2024 T3 et 40 avec des lames de nylon recouvertes de glace d'épaisseur variant de 2 à 10 mm. Dans tous ces essais, le bris du dépôt de glace se produit par une fissure du dépôt inclinée entre 45° et 60° par rapport au plan de la poutre et située dans les 2 premiers tiers de la longueur de l'échantillon à partir de la base. Cette fissuration est accompagnée d'un

décollement de la glace sur une distance d'environ 1/3 à 2/3 de la longueur de la poutre suivie, dans 50% des cas, d'un détachement de la glace.

Figure 6-17 montre une photographie d'un échantillon glace/nylon brisé par flexion dont la glace a décollé et s'est détachée à la base de la poutre. On y observe un bris de l'échantillon en mode mixte adhésif/cohésif où il y a décollement et fissuration à environ 60^0 .



Figure 6-17 : Échantillon brisé par flexion (nylon)

6.9 CARACTÉRISATION DES SYSTÈMES: MCKIBBEN, CPMI ET MFC

Cette section présente les résultats de l'évaluation du potentiel déglaçant des trois systèmes/matériaux actifs à l'étude soit: le muscle pneumatique McKibben, le système ionique CPMI et la membrane piezoélectrique MFC. Les expériences effectuées se veulent être très simples et ont comme objectif d'évaluer expérimentalement leur fonctionnement.

6.9.1 Le muscle pneumatique McKibben

Ce système pneumatique facile à fabriquer consiste en une membrane élastique recouverte d'un maillage de fils rigides tressés produisant une augmentation du diamètre et une diminution de sa longueur lorsqu'elle est gonflée à l'air comprimé. Des essais ont été réalisés à l'aide du montage décrit à la section 4.7.1 où deux LVDT de chaque côté de la membrane mesurent l'augmentation du diamètre. Les enregistrements en fonction du temps de l'augmentation du diamètre ont été obtenus à 4 différentes pressions où trois paramètres ont été évalués soit: l'augmentation du diamètre en mm, le pourcentage de déformation et le taux de déformation. Les résultats des essais effectués sont présentés au **Tableau 6-8** avec les conditions de pression.

Les résultats des expérimentations montrent que la déformation tangentielle de la membrane augmente lorsque la pression d'activation augmente de 137 à 551 kPa (20 à 80 psi), les niveaux de déformation augmentant respectivement de 9 à 77% pour des taux de 0,24 à 2,4 s⁻¹.

Tableau 6-8: Augmentation du diamètre du muscle McKibben à différentes pressions

| Pression (kPa) | Δ diamètre (mm) | ϵ % * | Taux ϵ s^{-1} |
|----------------|------------------------|--------------------|--------------------------|
| 137 | 0,7-0,93-1,5 | 5,6-7,8-12,7 | 0,24-0,20-0,28 |
| | 1,0 ± 0,4 | 9 ± 4 | 0,24 ± 0,04 |
| 275 | 5,58-6,8-6,7 | 46,5-57-55,8 | 1,98-1,75-2,20 |
| | 6,4 ± 0,7 | 53 ± 6 | 2 ± 2 |
| 414 | 8,40-8,44-8,31 | 70-70,4-69,2 | 2,02-2,46-2,36 |
| | 8,38 ± 0,07 | 69,9 ± 0 6 | 2,3 ± 0,2 |
| 551 | 9,17-9,19-9,17 | 76,5-76,6-76,4 | 2,17-2,43-2,60 |
| | 9,17 ± 0,01 | 76,5 ± 0,01 | 2,4 ± 0,2 |

$$*\epsilon \% = ((d_f - d_o)/d_o) * 100 \text{ où } d_o = 12,00 \text{ mm}$$

La deuxième étape des expérimentations a consisté à recouvrir la membrane d'une couche de glace variant de 2 à 3 mm dans une chambre climatique à -10 °C et à l'activer afin de la dégeler. Les principales observations des 6 essais sont résumées au Tableau 6-9.

Tableau 6-9: Observations lors de l'activation du système McKibben givré

(Couche de glace polycristalline de 2 à 3 mm d'épaisseur)

| Pression (kPa) | Observations |
|----------------|--|
| 551 | Déglaçage total |
| 483 | Déglaçage laissant des petites particules de glace mais le muscle doit rester activé quelques secondes |
| 483 | Déglaçage laissant des petites particules de glace |
| 414 | Déglaçage partiel laissant des endroits couverts de glace |
| 275 | Aucun déglaçage |
| 137 | Aucun déglaçage |

Le déglaçage s'effectue totalement et rapidement à une pression d'activation de 550 kPa ou 80 psi. Le choc mécanique produit est suffisant pour favoriser un bris cohésif de la glace très fragile à cette vitesse de déformation. À une pression plus basse, le déglaçage obtenu est partiel et n'est pas instantané. La forme cylindrique de la membrane et du dépôt de glace requiert un

bris cohésif de la glace afin qu'elle puisse se libérer de la gaine. L'efficacité du système est directement reliée à l'épaisseur de la glace, car l'énergie nécessaire à la fissuration cohésive de la glace est directement fonction du volume, de la résistance mécanique et de la rigidité de la glace. Ce mode de déglaçage par chocs mécaniques peut être pratique lorsque l'épaisseur de glace accumulée est faible ou si le système est déclenché à courts intervalles réguliers durant un épisode de givrage.

6.9.2 CPMI

Le système actif CPMI à l'étude est une membrane de copolymère métallique à échanges ioniques. Le mouvement de la membrane est principalement dû au déplacement des ions à l'intérieur de la celle-ci. Sous l'effet d'un champ électrique appliqué perpendiculairement à l'épaisseur, les ions attirés par l'électrode de charge opposée se distribuent inégalement. Ce déséquilibre provoque un gonflement d'un côté de la membrane qui fléchit lorsqu'elle est encastrée à une extrémité. Plusieurs facteurs influencent tout ce processus de mouvements ioniques complexes. Les essais effectués avec la membrane CPMI acquise n'ont pas eu comme objectifs d'en étudier le processus et ses facteurs, mais d'en caractériser, à l'échelle macroscopique, le déplacement selon le voltage appliqué en suivant les directives du manufacturier. Les premiers essais ont été effectués à température de la pièce avec une de membrane d'environ 2 cm par 10 cm. La bande a été placée à l'horizontale et à la verticale, et la déflexion obtenue après l'application d'un voltage a été mesurée avec une règle. Les courbes des déflexions obtenues en fonction du voltage appliqué sont montrées à la **Figure 6-18**.

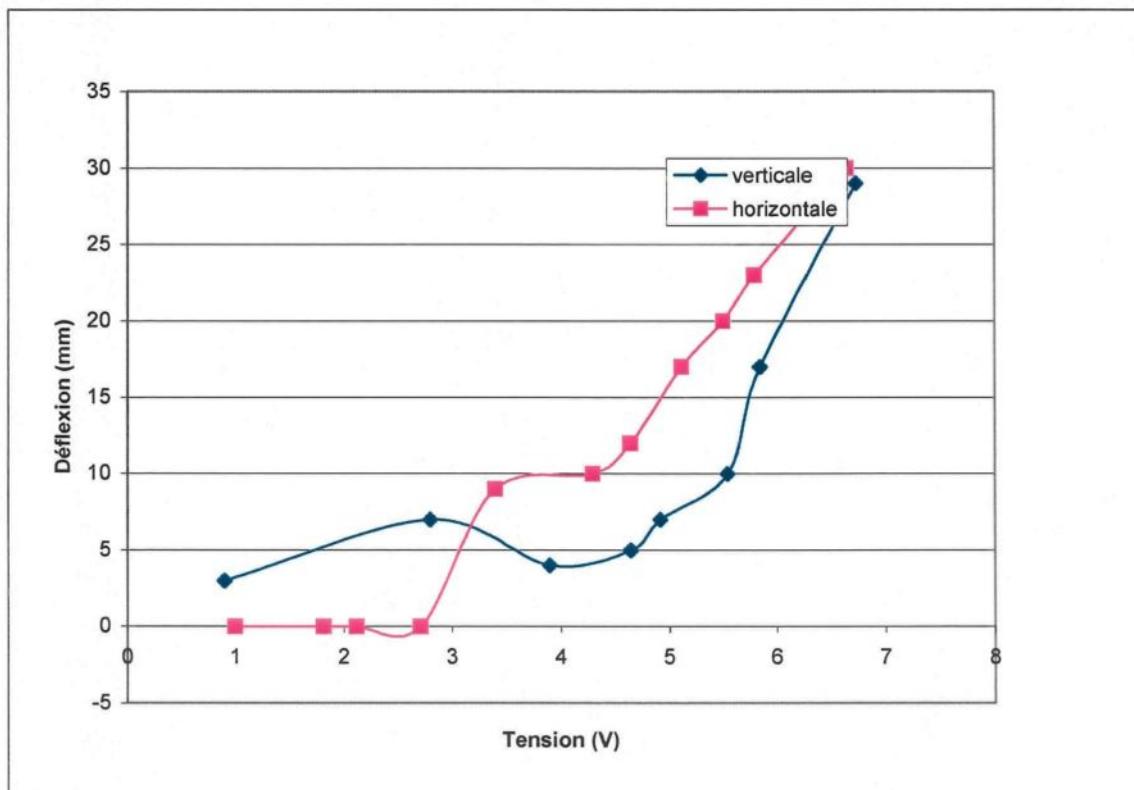


Figure 6-18: Déflexion maximale d'une bande de membrane CPMI de 2 x 10 cm de long mesurée à température ambiante en fonction du voltage

Le comportement de la membrane activée est presque aléatoire c'est-à-dire que la déformation obtenue est imprévisible et non contrôlée. En effet, pour le même voltage d'activation, la déflexion obtenue varie de très faible à très élevée. Afin d'uniformiser les résultats, plusieurs essais aux mêmes voltages ont été effectués et la déflexion maximum a été retenue. Malgré cela, les courbes obtenues demeurent erratiques. De plus, la membrane doit être constamment humidifiée par pulvérisation d'eau distillée afin de la maintenir active. Lors des essais, les performances de la membrane semblent être plus élevées à la position horizontale comparativement à la verticale.

Après la mesure des déflexions à température ambiante, le muscle a été introduit en chambre climatique à -10°C . À cette température, la membrane ne répond plus à aucun voltage, car le mouillage de la membrane avec de l'eau distillée n'est pas efficace. Afin d'améliorer le mouillage, une quantité de glycol a été ajoutée à l'eau distillée (25% en poids). Aucune amélioration n'a été observée. La température de la chambre a été augmentée à -5°C . À cette température, la membrane mouillée avec le mélange d'eau-glycol répond au voltage de 7 V correspondant au maximum applicable. La déflexion obtenue est d'environ 10 mm. Cependant, celle-ci n'est pas constante et on observe beaucoup d'hystérésis lors du retour. Par la suite, la membrane maintenue à -5°C exposée à de l'eau pulvérisée a été recouverte d'une couche d'environ 1 mm de glace translucide (**Figure 6-19**)



Figure 6-19: Membrane CPMI glacée (-5°C)

Un voltage de 5 V a été appliqué sans obtenir de résultats. En augmentant celui-ci à 7 V et en maintenant le voltage appliqué pendant 5-6 secondes, la membrane s'est libérée de la glace

(Figure 6-20). Un film d'eau observable à la surface de la glace préalablement collé à la membrane ainsi que le temps nécessaire au déglaçage laisse supposer que le déglaçage a été permis grâce à l'apport d'énergie thermique à la membrane. La puissance dissipée par la membrane, calculée à partir du courant et du voltage, atteint 14 W, soit $0,7 \text{ kW/m}^2$.



Figure 6-20: Membrane CPMI déglacée

La membrane CPMI possède théoriquement les caractéristiques nécessaires d'un système/matériaux déglaçant, car de faibles voltages suffisent pour produire des déformations importantes. Par contre, son utilisation demeure difficile en raison du manque de contrôle de la déformation obtenue, de son imprécision ainsi que le besoin d'être constamment maintenue humide. Son application pour le déglaçage requiert le développement de dispositifs de contrôle fiables et précis ainsi que le développement de membranes actives plus performantes.

6.9.3 MFC

Le système MFC acronyme de *MicroFiber Composite* consiste en un arrangement en série de fibres de céramique aux propriétés piézoélectriques. Les premiers essais ont consisté à caractériser la force développée en fonction du voltage appliqué à 5 fréquences différentes (0,74; 0,86; 1,4; 3,2; 25 Hz). À chaque voltage appliqué, entre 200 et 1000 V, on a noté le poids maximum que la membrane pouvait soulever par flexion. À partir de cette force et des caractéristiques géométriques, on a calculé la contrainte normale à la surface. Les résultats obtenus à -10 °C avec deux membranes identiques, selon le manufacturier, sont montrés à la **Figure 6-21** et à la **Figure 6-22**.

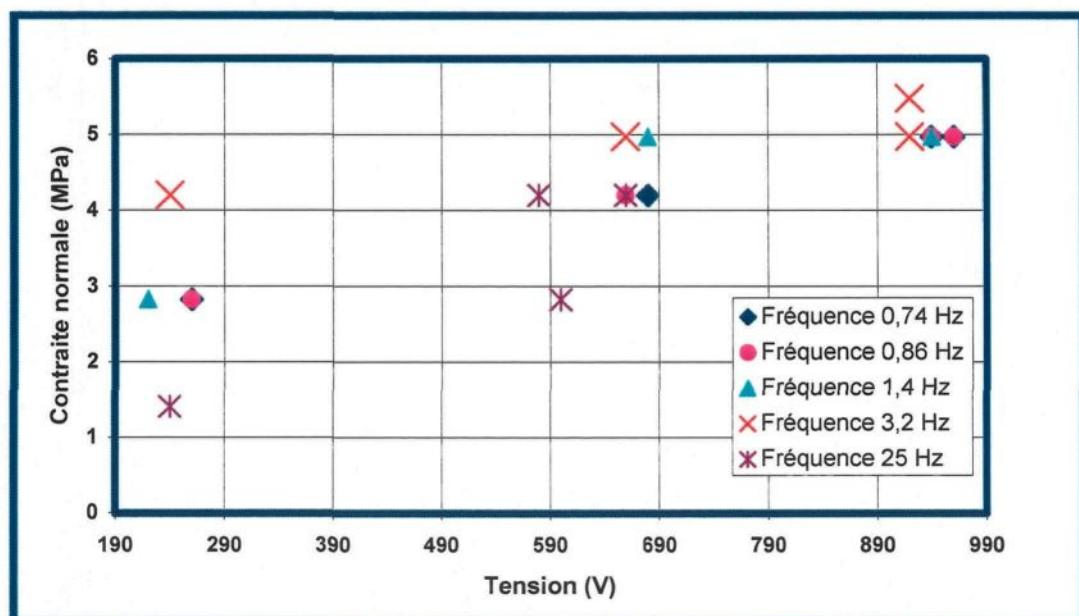


Figure 6-21: Contrainte normale (MPa) en fonction de la tension électrique (V)
(-10 °C , membrane # 17103-010C)

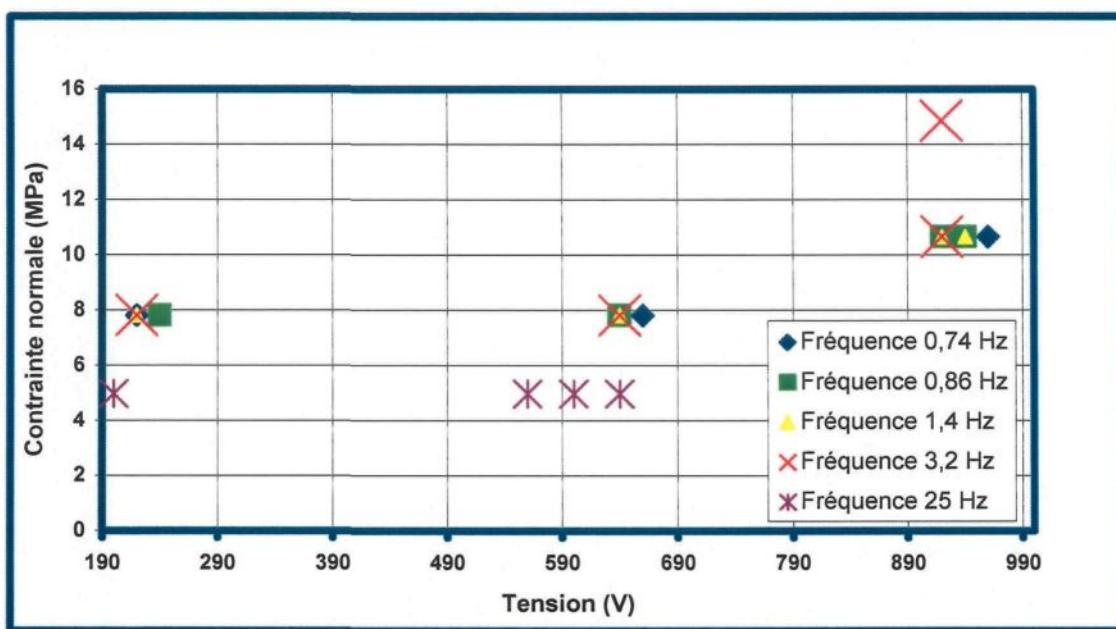


Figure 6-22 : Contrainte normale (MPa) en fonction de la tension électrique (V)
(-10 °C , membrane # 17103-013C)

Premièrement, on remarque que les propriétés électromécaniques des deux membranes diffèrent considérablement l'une de l'autre. Bien que les courbes contrainte-voltage aux quatre fréquences présentent une pente positive, elles n'ont pas le même profil. Si la première tend à être linéaire, la deuxième tend à être exponentielle. Deuxièmement, dans les deux cas, la force maximale est développée à 3,2 Hz. Cette membrane possède l'avantage d'être plus simple d'utilisation qu'un CPMI, car elle est efficace dans l'air sec froid à -10 °C.

Cependant, à partir de la force maximale obtenue de 0,14 N, les contraintes à l'interface (en supposant que la membrane serait recouverte de 5 mm de glace et qu'elle est 10 fois plus rigide que la glace) sont de l'ordre de 0,0001 MPa en cisaillement et de 0,14 MPa en tension. Selon les résultats obtenus lors des essais de flexion givrés, la force développée par le muscle serait 40 fois trop faible pour dégeler une couche de glace de 2 mm.

CHAPITRE 7

DISCUSSION

7. DISCUSSION

7.1 INTRODUCTION

La discussion rappelle d'abord les objectifs lors de la conception des montages expérimentaux afin de mettre en perspective les résultats obtenus en traction, torsion et flexion givrées. Premièrement, les résultats de déformations et de contraintes seront comparés à ceux existant en littérature suivis d'une discussion sur les effets de l'épaisseur. On traitera ensuite, du comportement mécanique fragile de la couche de glace ainsi que des effets du substrat et du mode de déformation. Un tableau récapitulatif sera présenté à la fin du chapitre pour visualiser l'ensemble des résultats. Finalement, on conclut le chapitre en présentant une liste de critères de déglaçage basée sur la déformation de même qu'une appréciation générale des systèmes actifs étudiés.

7.2 RAPPEL DE L'OBJECTIF PRINCIPAL DES MONTAGES EXPÉRIMENTAUX

Les montages n'ont pas été conçus pour l'analyse fine du comportement mécanique de la glace ni pour simplifier les contraintes lui étant imposées via le substrat. Ils ont plutôt été conçus pour simuler le comportement d'un matériau glacé déformé sous l'action d'un stimulus externe en mesurant la déformation à laquelle il y a bris de la glace. De plus, les matériaux électrodéformables les plus efficaces étant généralement très minces, les essais devaient être effectués avec des échantillons aussi minces que possible. Les montages devaient être opérables à -10 °C et l'échantillon glacé devait subir le minimum de manipulations avant d'être déformé. Les essais devaient également être réalisables avec différentes épaisseurs de glace et à différentes vitesses de déformation.

Lors de la conception et l'élaboration de la méthodologie, applicable à la simulation d'un matériau électrodéformable glacé, on a mis surtout l'emphase sur la précision des mesures de déformation et à un degré moindre sur l'exactitude de l'évaluation des contraintes. En effet, l'évaluation des contraintes constitue un objectif secondaire, même s'il permet une analyse plus complète du comportement glace/substrat et de faire le pont entre les travaux déjà existants. L'évaluation des contraintes associées à la déformation imposée s'est donc faite avec des modèles mécaniques les plus simples possible, soit celui où l'échantillon glacé se déforme en **régime élastique linéaire** où la loi de Hooke est applicable.

7.3 L'ESSAI DE TRACTION GIVRÉ

Contrairement aux essais de torsion et flexion où les contraintes ont été calculées à partir des forces mesurées au moment du bris, lors des essais de traction, les contraintes normales à l'interface dans la glace ont été évaluées à partir des déformations mesurées par la jauge. Au chapitre 5, on a montré que les mesures expérimentales de déformation sont précises à 1%. Cependant, il reste à montrer que le positionnement de la jauge sur la surface non glacée du substrat permet d'obtenir des valeurs valides de déformations applicables à l'interface.

7.3.1 Vérification du calcul des contraintes à partir de la déformation

Afin de valider les contraintes de calculées à partir des déformations de rupture mesurées (Tableau 6-4), les calculs ont été refaits à partir de la force appliquée au moment du bris. Pour ce faire, un modèle théorique basée sur la théorie des poutres hétérogènes présenté par Mehran

Riahi (M., Mehran, 2007) a été utilisé. Dans ce modèle, la contrainte normale dans la glace à l'interface à la mi-longueur, $\sigma_{1/2}$ est égale à :

$$\sigma_{1/2} = \frac{P}{A} - \frac{My}{I} \quad \text{Équation 7-1}$$

Où :

P = charge appliquée (N)

A = aire de la section glacée additionnée à l'aire de la section équivalente du substrat (m^2)

M = moment fléchissant (n.m)

y = distance de l'interface par rapport à l'axe neutre (m)

I = moment d'inertie de la poutre hétérogène (m^4)

Les contraintes calculées à partir de la force sont présentées au **Tableau 7-1**. Un exemple de calcul obtenu avec le logiciel *Maple* applicable à l'essai 5m7ess2 est détaillé à l'**ANNEXE 8**.

Tableau 7-1 : Contraintes calculées à partir de la force de rupture lors de l'essai de traction pour l'aluminium 2024 T3

| CALCULÉES À PARTIR DE LA FORCE | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|
| ESSAI | 2m7ess2 | 5m7ess2 | 10m7ess1 |
| Épaisseur de glace | 2 mm | 5 mm | 10 mm |
| $\sigma_{\text{int. glace}}$ (MPa) | 4,73 | 3,67 | 1,74 |
| Contribution de la traction | 3,73 | 1,93 | 0,71 |
| $\sigma_{T \text{ int. glace}}$ (MPa) | | | |
| Contribution de la flexion | 0,99 | 1,75 | 1,03 |
| $\sigma_{F \text{ int. glace}}$ (MPa) | | | |
| $\epsilon_{\text{calculée}}$ ($\mu\epsilon$) | 634 | 413 | 185 |
| CALCULÉES À PARTIR DE LA DÉFORMATION | | | |
| (Tableau 6-4) | | | |
| $\sigma_{\text{int. glace}}$ (MPa) | 5,6 | 4,0 | 2,0 |
| $\epsilon_{\text{rupture}}$ ($\mu\epsilon$) | 570 | 400 | 196 |

Les valeurs calculées à partir de la force sont très proches de celles obtenues à partir des déformations mesurées. Par exemple, dans l'essai avec 10 mm de glace, la contrainte normale à l'interface est de **1,74 MPa** (dont 0,71 MPa provient de la traction et 1,03 MPa de la flexion) comparativement à la valeur de **2,0 MPa** déterminée à partir de la déformation. La déformation de rupture dans cette approche est de 185 $\mu\epsilon$ ce qui est comparable à celle mesurée de 196 $\mu\epsilon$. Ainsi, les contraintes calculées à partir des déformations de rupture mesurées au moment du bris représentent une bonne approximation de la contrainte normale dans la glace à l'interface. Toutefois, le calcul à partir de la force permet de différencier la flexion de la traction, ce que ne peut faire la mesure expérimentale de la jauge.

7.3.2 Validité de la contrainte de rupture

La déformation de rupture moyenne mesurée dans tous les essais, c'est-à-dire avec les trois substrats, à toutes les épaisseurs de glace et à toutes les vitesses de déformation vaut **393 \pm 143 $\mu\epsilon$** . Selon le modèle élastique utilisé, en multipliant cette dernière par le module d'Young de la glace, on peut évaluer la contrainte normale de rupture en tension dans la couche glace à **3,9 \pm 1,4 MPa**. Il n'existe pas dans la littérature de valeurs expérimentales de résistance et du module d'Young déterminées en traction avec de la glace accrétée sur un substrat pouvant être comparables avec celles obtenues dans nos essais. Par contre, on dispose de données sur la résistance en tension mesurée avec un échantillon de glace non accrétée sur un substrat. L'Équation 3.1 donnée au chapitre 3 est représentative de ces données. Selon cette équation, la résistance en tension pour une glace polycristalline (-10 °C) ayant un grain de $1,6 \pm 0,2$ mm de diamètre vaut **1,8 \pm 0,1 MPa**. Sur la base de cette valeur, la contrainte de rupture moyenne de **3,9 MPa** obtenue lors des essais serait 2 fois plus élevée.

7.3.3 Causes d'erreurs

Cet écart peut être attribuable à plusieurs facteurs. Premièrement, il y a des imprécisions qui ont pu se glisser dans les calculs de la contrainte de rupture. En effet, on a utilisé la valeur maximum de 9,9 GPa pour le module d'Young de la glace mesurée par Gold de façon ultrasonic (L.W., Gold, 1958). En considérant la valeur citée la plus faible de 8,95 GPa, la valeur de 3,9 MPa diminuerait à 3,5 MPa. Donc, l'erreur attribuable à l'utilisation du module d'Young maximum est insuffisante pour expliquer tout l'écart. La deuxième source d'erreur proviendrait de la méthode de détermination de la déformation de rupture à partir des enregistrements graphiques. L'erreur sur la déformation de rupture ainsi déterminée peut être évaluée à $\pm 30 \mu\epsilon$, correspondant à une variation de seulement $\pm 0,3$ MPa dans le calcul de la contrainte de rupture. Donc, les imprécisions dans le calcul de la contrainte ne semblent pas être suffisantes pour expliquer tout l'écart avec la valeur de référence.

En second lieu, il y a les erreurs dans le calcul de la contrainte de référence utilisant la relation empirique (Équation 3-1) où la température et la grosseur des grains de glace n'ont peut-être pas été bien évaluées. Effectivement, la grosseur des grains influence de façon marquée la valeur résistance en tension. Par exemple, un grain de 0,8 mm soit deux fois plus petit fait augmenter la contrainte à 2,6 MPa au lieu de 1,8 MPa. Comme la grosseur moyenne du grain utilisée pour les calculs n'a été évaluée que sur échantillon, il est possible que les grains des échantillons de traction soit plus petits de ceux de l'échantillon.

Enfin, la valeur de référence utilisée est celle d'un échantillon de glace non confiné, i.e. non accrétée sur un substrat, ce qui ne tient pas compte de la présence à l'interface glace/substrat de la couche limite faible. La structure spécifique du dépôt de glace accrétée, décrite à la section **2.3.1**, peut lui conférer des propriétés mécaniques différentes de celle de la glace non accrétée.

7.3.4 Effet de la flexion

7.3.4.1 Contrainte normale à l'interface dans la glace

Comme il a été mentionné précédemment, le fait que l'axe de la traction ne corresponde pas à l'axe neutre de l'échantillon provoque une flexion de l'échantillon hétérogène. Le **Tableau 7-2** montre l'emplacement de l'axe neutre des lames composites utilisées pour les essais. Les **valeurs positives** correspondent à une position au dessus de l'axe neutre **dans la glace**.

Tableau 7-2 : Emplacements de l'axe neutre des lames composites alu et nylon/glace

| Épaisseur de glace (mm) | Distance de l'interface à l'axe neutre (mm) | |
|----------------------------|--|--------|
| | Aluminium 2024 T3 | Nylon |
| 12 | 4,3 | 5,9 |
| 10 | 3,3 | 4,9 |
| 8 | 2,4 | 3,9 |
| 6 | 1,6 | 2,9 |
| 5 | 1,2 | 2,4 |
| 3 | 0,4 | 1,4 |
| 2 | 0,1 | 0,9 |
| 1 | -0,1 | 0,3 |
| 0,5 | -0,3 | -0,005 |

Aux conditions d'essais, entre 2 et 10 mm de glace, l'axe neutre se situe donc toujours dans la glace. Par exemple, pour l'aluminium 2024 T3, l'axe neutre est à 0,1 mm de l'interface quand il y a 2 mm de glace et à 3,3 mm avec 10 mm de glace. Dans tous ces cas, la contrainte normale à

l'interface due au moment de flexion est en tension et s'additionne à celle imposée par la traction. Le **Tableau 7-1** montre pour chaque épaisseur de glace sur l'aluminium 2024 T3 la contribution de la traction et la contribution de la flexion, $\sigma_{T\ int.\ glace}$ et $\sigma_{F\ int.\ glace}$. À 2 mm de glace, la contribution de la flexion représente 20% de la contrainte normal à l'interface dans la glace et à 10 mm, elle représente 60% de celle-ci. Donc, plus l'épaisseur de glace augment, plus elle devient importante.

7.3.4.2 Contrainte en cisaillement à l'interface dans la glace

Comme pour la contrainte normale, il est possible d'évaluer la contrainte en cisaillement provoquée par le moment de flexion. Celle-ci a été évaluée à différents endroits, x , sur la longueur glacée à partir des 2 équations suivantes :

$$\tau = \frac{VQ}{I_{composite} b_{AL}} \quad \text{Équation 7-2}$$

où :

$$Q = e_{AL} b_{AL} \left(y - \frac{e_{AL}}{2} \right) \quad \text{Équation 7-3}$$

La **Figure 7-1** montre le graphique du cisaillement (MPa) correspondant à l'essai 5m7ess2 avec l'Al 2024T3 et 5 mm de glace (**ANNEXE 8**). Le graphique montre, l'intensité de la contrainte en cisaillement (MPa) en fonction de sa position x (mm).

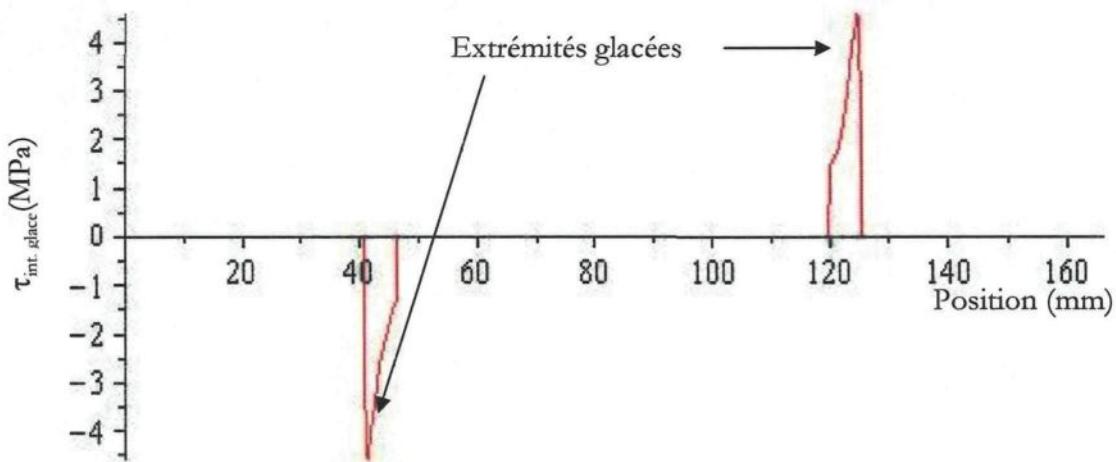


Figure 7-1: Contrainte en cisaillement (MPa) en fonction de sa position x (mm) pour la traction d'une lame d'aluminium 2024 T3 recouverte de 5 mm de glace (5m7ess2)

L'échantillon de glace n'est pas rectangulaire sur le substrat. À chaque extrémité, l'épaisseur de glace diminue pour devenir nulle sur une courte distance produisant un profil approximé à 45°. On peut voir par ce graphique que cette variation importante de l'épaisseur produit un cisaillement significatif aux deux bouts de l'échantillon glacé mais un cisaillement négligeable à la mi-longueur. Avec 5 mm de glace, la contrainte de cisaillement est non négligeable avec une valeur de 4,5 MPa. Le délaminate et/ou la fissuration de l'échantillon sont donc plus susceptibles de se développer aux extrémités qu'au centre. D'ailleurs, comme il a été mentionné à la section de l'analyse visuelle des essais de traction: *L'amorce du bris soit le décollement ou l'apparition de fissures se produit généralement à une ou simultanément aux deux extrémités de l'échantillon. Les extrémités présentent généralement un plus grand nombre de fissures.* Par contre, les concentrations de contrainte aux deux extrémités ne semblent pas influencer les contraintes et les déformations évaluées et mesurées au milieu de l'échantillon de glace. Car, si elle le ferait,

les valeurs seraient moins élevées que celles de référence. Or, c'est précisément l'inverse qui a été observé.

En général, la flexion contribue de façon importante dans le bris de l'échantillon glace/substrat en traction. Sa contribution est importante dans la contrainte de rupture normale à l'interface dans la glace et cette contribution augmente au fur et à mesure que l'épaisseur de glace augmente. De plus, le mode de rupture de l'échantillon est influencé par le cisaillement car les fissures ou les amorces de décollement surviennent plus souvent aux extrémités là où le cisaillement est plus important.

7.4 L'ESSAI DE TORSION GIVRÉ

7.4.1 Validité des contraintes de rupture en cisaillement

Le cisaillement de rupture dans la glace à l'interface obtenu lors des essais de torsion, vaut en moyenne, $1,3 \pm 0,8$ MPa pour l'aluminium et $0,4 \pm 0,2$ MPa pour le nylon. L'analyse visuelle des essais (section 6.8.2) a montré que dans 94% des essais, le bris de l'échantillon composite se produit par une fissure dans la glace combinée à un décollement. Malheureusement, la précision de l'analyse vidéo n'est pas suffisante pour déterminer lequel des deux phénomènes, fissuration ou décollement, survient en premier. Donc, la contrainte de rupture mesurée peut être soit la résistance en cisaillement de la glace (cas d'une fissuration) ou soit la contrainte d'adhérence du dépôt de glace (cas d'un décollement).

Dans le premier cas, soit la fissuration de la glace, la contrainte de rupture obtenue expérimentalement peut être comparée aux seuls résultats expérimentaux disponibles en

littérature soient ceux obtenus par Julien Bilodeau dans le cadre de sa maîtrise à l'UQAC (J. Bilodeau, 1996) qui ont été discutés à la section 2.2.2. L'échantillon glacé de forme cylindrique se rompt à des contraintes variant de **0,3 MPa** à **1,3 MPa** en fonction du taux de déformation (épaisseur d'environ 14 mm de glace et $T_{\text{glace}} = -14^{\circ}\text{C}$). Ces dernières coïncident donc avec les valeurs mesurées.

Dans le deuxième cas, soit le décollement de la glace, la contrainte de rupture obtenue peut être comparée aux différents résultats d'adhérence de glace présentés au Tableau 2-2. L'adhérence de la glace à différents substrats métalliques varie entre **0 et 1,96 MPa** (épaisseur de glace variable et T_{glace} variant entre 0 à -15°C). Encore une fois, ces valeurs coïncident avec celles de $1,3 \pm 0,8 \text{ MPa}$ et $0,4 \pm 0,2 \text{ MPa}$ obtenues expérimentalement pour l'aluminium et le nylon. On remarque que pour les deux types de contraintes en jeu : la résistance en cisaillement et l'adhérence du dépôt de glace, les intervalles des valeurs sont pratiquement les mêmes. Il est donc impossible, à partir des contraintes, de déterminer quel phénomène, la fissuration ou le décollement, est prépondérant lors de la rupture de l'échantillon composite. Les deux phénomènes demeurent liés.

7.4.2 Effet de l'épaisseur

L'effet de l'épaisseur de la glace sur les résultats de torsion givrée avec l'aluminium et le nylon sont présentés aux Figure 7-2 et Figure 7-3 où les losanges bleus représentent les déformations en cisaillement de rupture et les cercles roses les contraintes en cisaillement de rupture. Ces deux paramètres augmentent en fonction de la réciproque de l'épaisseur ($1/e$). On

notera que la dispersion entre les valeurs obtenues à 2 mm de glace le double que pour celle obtenues avec 10 mm.

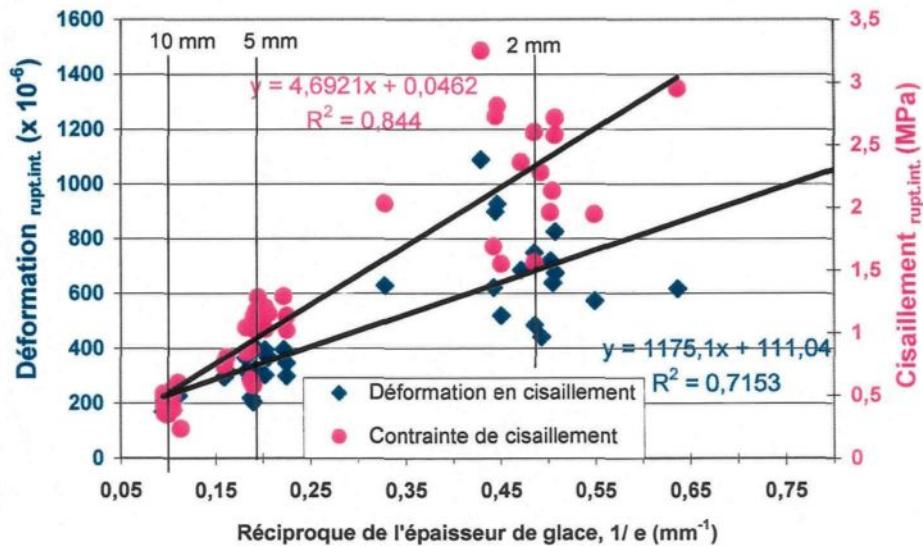


Figure 7-2: Cisaillement et contrainte de rupture en fonction de la réciproque de l'épaisseur de glace d'un échantillon d'Al 2024 T3/GLACE

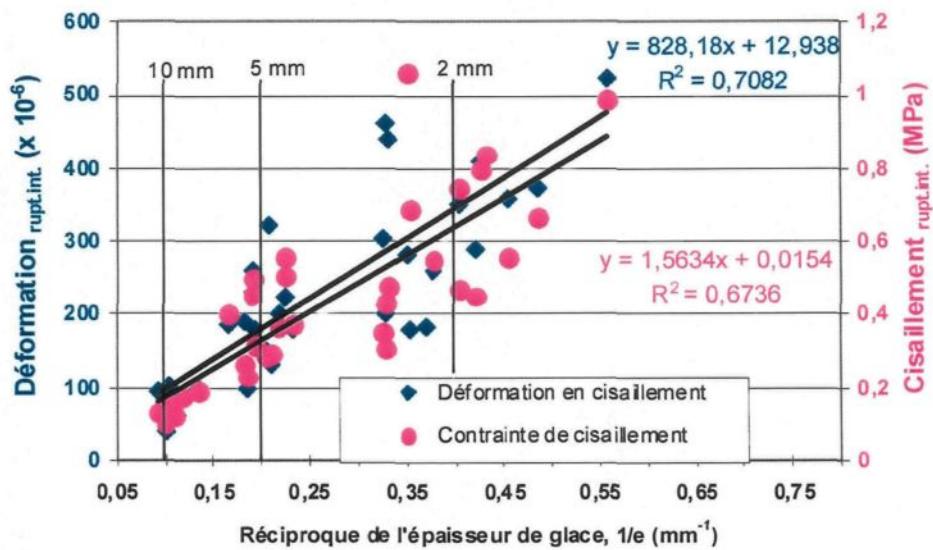


Figure 7-3: Cisaillement et contrainte de rupture en fonction de la réciproque de l'épaisseur de glace d'un échantillon de NYLON/GLACE

Ces résultats sont cohérents avec le modèle mécanique utilisé. En effet, lors des expérimentations, il a été observé que le couple T nécessaire au bris de la glace augmente au fur et à mesure que l'épaisseur de glace sur les tubes augmente ($T = k_T \cdot e$). Or, le cisaillement à l'interface de la glace est fonction du couple exercé multiplié par le rayon à l'interface et divisé par le moment polaire J . Si le moment polaire augmente selon le carré de l'épaisseur de glace

($J = k_J \cdot e^2$) et que le rayon à l'interface demeure constant, le cisaillement devient fonction de l'inverse de l'épaisseur :

$$\tau = T \cdot r / J \text{ soit } \tau = (k_T \cdot e) r_{int} / (k_J \cdot e^2) = k / e$$

7.5 L'ESSAI DE FLEXION GIVRÉ

Lors de la flexion d'une poutre d'aluminium 2024 T3 glacée, la déformation de rupture moyenne est de $40 \mu\epsilon$ avec un coefficient de variation de 75%, tandis que celle atteinte avec le nylon est beaucoup plus élevé valant $330 \mu\epsilon$ avec de 24% de variation. À ces niveaux de déformation, la force appliquée produit des contraintes normales et en cisaillement valant respectivement $-0,06 \text{ MPa} \pm 250\%$ et $0,014 \text{ MPa} \pm 36\%$ pour l'aluminium, et $-0,7 \text{ MPa} \pm 114\%$ et $0,06 \text{ MPa} \pm 33\%$ pour le nylon. Dans ces calculs, l'échantillon composite, la glace, le substrat et le lien d'adhérence ont été considérés comme étant élastiques linéaires et l'épaisseur de glace équivalente a été calculée à partir du rapport de rigidité de la glace et du substrat.

7.5.1 Validité des contraintes de rupture

Il ne semble pas exister, dans la littérature, des valeurs de contrainte de rupture d'un dépôt glacé **en flexion** où celui-ci est volontairement soumis à une combinaison des contraintes normales et en cisaillement.

Dans les travaux de maîtrise relatifs à cette thèse (C., Laforte, 2001), des essais d'adhérence ont été effectués dans les mêmes conditions mais avec une géométrie différente où l'axe neutre est à l'interface glace/substrat maximisant ainsi la contribution du cisaillement à cet endroit. Avec cette approche, la contrainte en cisaillement moyenne calculée à l'interface sur l'aluminium 6061 T6 est de $0,082 \pm 0,003 \text{ MPa}$.

Dans les travaux de cette thèse, le cisaillement de rupture obtenu pour l'aluminium est plus faible valant 0,014 MPa. Les valeurs plus faibles obtenues peuvent s'expliquer par le fait que pour notre géométrie, l'axe neutre n'est pas positionné à l'interface. De ce fait, des contraintes normales viennent s'additionner au cisaillement et contribuent à la rupture et ainsi diminuer le cisaillement de rupture. Quant aux valeurs de contraintes normales, nos résultats ne peuvent être validés ou infirmés par comparaison, car il n'existe, à notre connaissance, aucune autre étude ayant évalué les contraintes normales et le cisaillement lors de la flexion d'une poutre glacée.

7.5.2 Effet de l'épaisseur de glace

L'influence de l'épaisseur de la glace est illustrée par les quatre (4) graphiques suivants. Les deux premiers graphiques présentent la déformation de rupture (losanges bleus) en fonction de l'épaisseur de glace recouvrant l'Al2024 T3 (**Figure 7-4**) et le nylon (**Figure 7-5**). Pour les deux matériaux, la déformation de rupture tend à diminuer lorsque l'épaisseur de glace augmente de 2 à 5 mm. Cependant, lorsque l'épaisseur passe de 5 à 10 mm, les déformations de rupture se comportent différemment. Effectivement, avec l'aluminium il y a une légère décroissance proportionnelle à l'épaisseur tandis qu'avec le nylon, la courbe est plus étendue et demeure constante. Les forts coefficients de variation en jeu limitent toutefois la portée de notre analyse.

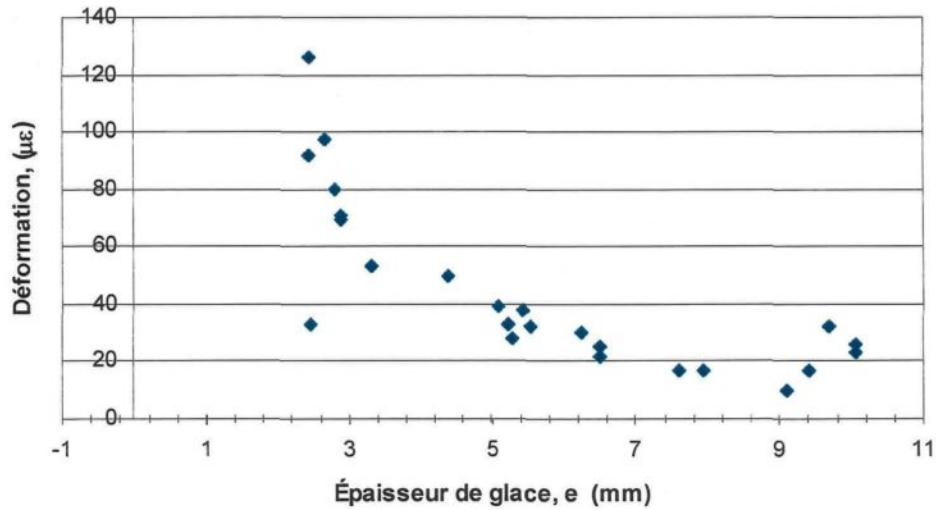


Figure 7-4: Déformation de rupture en flexion en fonction de l'épaisseur de glace pour l'Al 2024 T3

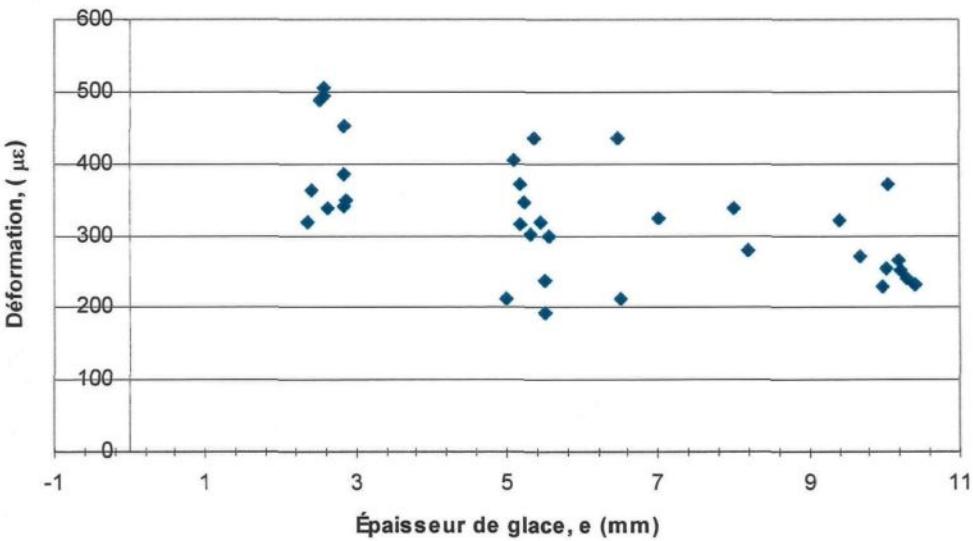


Figure 7-5: Déformation de rupture en flexion en fonction de l'épaisseur de glace pour le NYLON

Deux autres graphiques, soit les Figure 7-6 et Figure 7-7, illustrent l'influence de l'épaisseur sur les contraintes normales et en cisaillement lors de la rupture. Trois séries de points y sont présentées soit: les contraintes cisaillement (triangles rouges), les contraintes normales en

tension (losanges bleus) et les contraintes normales en compression (carrés roses). L'axe des ordonnées de gauche est celui des contraintes normales négatives en compression et positives en tension en MPa tandis que l'axe de droite est celui des contraintes en cisaillement également en MPa. Deux courbes de couleurs différentes avec leurs équations indiquent les tendances.

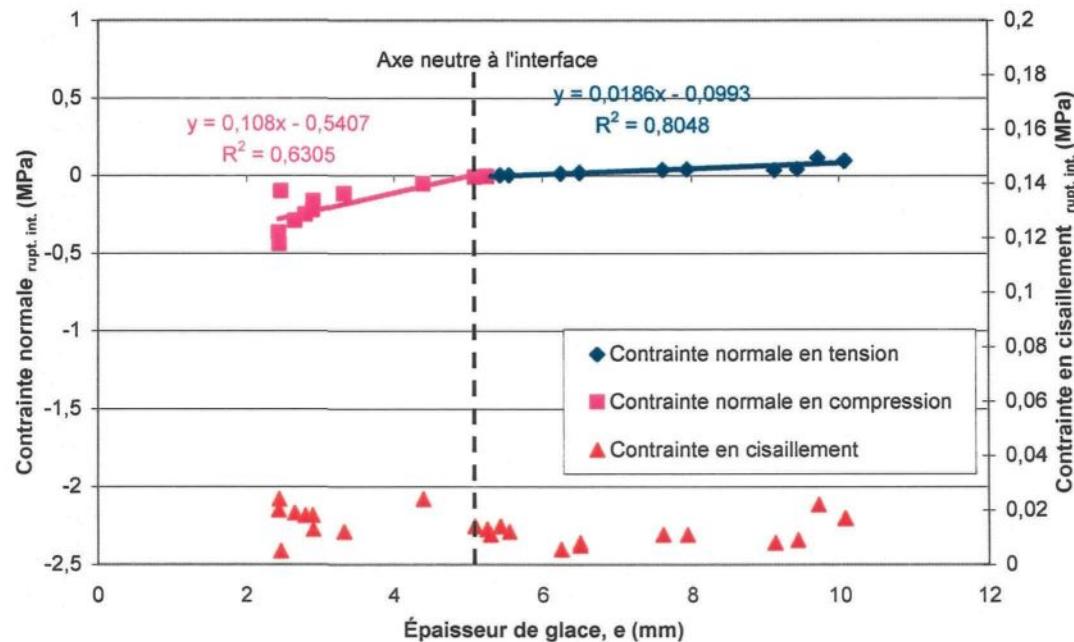


Figure 7-6: Contraintes de rupture normale et en cisaillement en fonction de l'épaisseur de glace pour l'Al 2024 T3

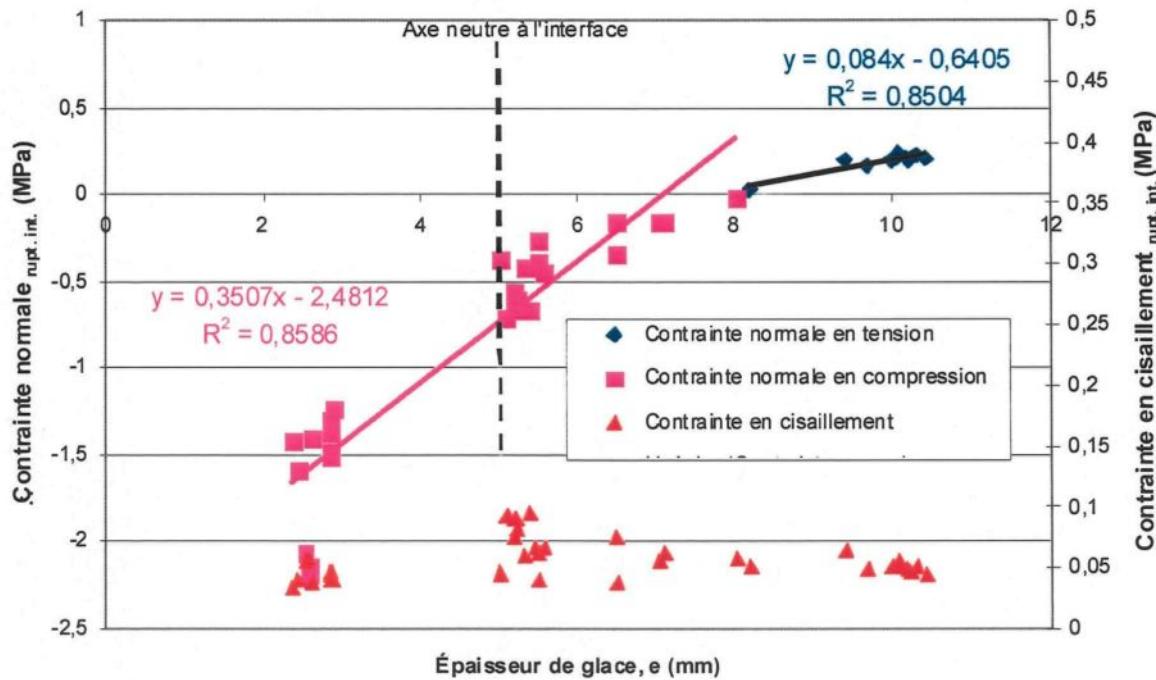


Figure 7-7: Contrainte de rupture normale et en cisaillement en fonction de l'épaisseur de glace pour le NYLON

Les courbes montrent que la contrainte en cisaillement reste pratiquement constante avec l'épaisseur de la glace, tandis que les contraintes normales varient avec l'épaisseur de glace étant en compression en bas de l'axe neutre, proche de zéro à l'axe neutre et en tension après l'axe neutre. Cet effet de l'épaisseur sur les contraintes de ruptures normales et en cisaillement s'explique si on considère que la rupture est due aux effets combinés des contraintes en cisaillement et normale agissant à l'interface.

À la section 6.8.3 portant sur l'examen visuel du bris des échantillons de flexion, on a noté que tous les bris se produisent par une fissuration sur un plan incliné à 45° ou plus. Le bris de

l'échantillon de la glace est en mode mixte adhésif/cohésif. Normalement, la fissuration sur un plan à 45°, est le résultat d'une contrainte en cisaillement. Cependant, on a observé des fissures formant un angle plus élevé que 45°. Cette orientation plus élevée que 45° indiquerait que la fissure serait causée majoritairement par les contraintes en cisaillement auxquelles viennent s'ajouter des contraintes normales. La contribution des contraintes normales serait d'autant plus importante que l'on s'écarte de l'axe neutre. À la lumière de ces observations, on peut affirmer que les contraintes en cisaillement et les contraintes normales sont mises à contribution lors du bris de l'échantillon lors de l'essai de flexion givrée.

7.6 COMPORTEMENT FRAGILE DE LA GLACE ACCRÉTÉE

Le comportement dynamique de glace polycristalline non accrétée est bien documenté en littérature où les propriétés mécaniques ont été étudiées en fonction du taux de déformation. De façon générale, les contraintes de rupture de la glace augmentent linéairement avec le taux de déformation dans le domaine ductile pour devenir constantes dans le domaine fragile. Le taux de déformation auquel le changement se produit définit la transition ductile-fragile.

Par contre, il existe peu d'études sur les propriétés dynamiques de rupture d'une couche de glace polycristalline accrétée sur un substrat. Afin de caractériser le type de comportement dynamique dans nos essais, ces derniers ont été effectués à différentes vitesses de déformation. Or, toutes les contraintes de rupture obtenues se sont avérées indépendantes du taux de déformation dans un intervalle de 8×10^{-6} à $4,4 \times 10^{-3}$. Donc, on peut affirmer que, dans tous les essais, la couche de glace accrétée s'est donc comportée de façon fragile.

Dans les essais de flexion et traction givrés où il y a du cisaillement et des contraintes normales combinées, le comportement dynamique de la couche de glace est le même que celui de la glace polycristalline non accrétée sur une surface. Cependant, dans les essais de torsion, où le décollement se fait par cisaillement pur, un comportement fragile a été obtenu à des taux de déformation plus faibles que ceux attendus pour une glace polycristalline non confinée. Effectivement, la contrainte de rupture est du type fragile à des taux variant de 4×10^{-6} à $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, soit des valeurs beaucoup plus faibles que celles citées au **Tableau 2-1** de $3 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$. Donc, les essais d'adhérence où la glace est sollicitée principalement par cisaillement pourraient être effectués plus lentement que les essais mécaniques conventionnels, tout en ayant un comportement fragile de la glace.

7.7 EFFET DU MODE DE DÉFORMATION

Le **Tableau 7-3** résume en partie les résultats présentés dans le chapitre 6. Il est divisé en trois groupes, un pour la traction, un pour la torsion et un pour la flexion, chaque groupe étant subdivisé en colonnes indiquant le substrat. Chaque ligne correspond à une valeur globale moyenne et son écart-type sans tenir compte de l'épaisseur de glace et du taux de déformation. La première présente l'adhérence de la glace (MPa) telle que mesurée par la force centrifuge et la seconde, les rugosités R_a (μm) mesurée sur les substrats. Les trois dernières lignes présentent les valeurs de la déformation, des contraintes normales et en cisaillement telles qu'évaluées à l'interface glace/substrat juste avant la rupture de la glace.

En général, si on tient compte des écarts types, il existe une différence peu significative entre les déformations de rupture mesurées dans les trois types d'essais celles-ci valant en moyenne

$400 \pm 100 \mu\epsilon$, exception de la valeur la plus faible de $40 \mu\epsilon$ mesurée en flexion givrée avec l'aluminium. Lors de la conception d'un système de déglaçage où l'énergie est transférée à la glace via le substrat, l'utilisation de la déformation à la rupture comme critère est simple car elle varie peu selon le mode de sollicitation.

La combinaison des contraintes normales et en cisaillement à l'interface semble faciliter le bris de l'échantillon givré en réduisant les contraintes nécessaires à la rupture. En effet, c'est en flexion, soit le mode de déformation où la glace est soumise aux deux types de contraintes, que les contraintes de rupture sont les plus faibles. Par exemple, le cisaillement de rupture obtenu en flexion est plus faible que celui obtenu en torsion où le cisaillement est supposé pur. Pour l'aluminium, le cisaillement de rupture vaut $0,014 \text{ MPa} \pm 36\%$ en flexion et $1,27 \text{ MPa} \pm 67\%$ en torsion. Le même constat a été fait par Jellinek où l'adhérence mesurée en tension s'est avérée plus élevée qu'en cisaillement (Jellinek, 1962).

Tableau 7-3 : Comparaison des trois modes de déformation

$$T_{\text{air et glace}} = -10 \text{ }^{\circ}\text{C}, \rho = 0,89 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$$

| Essai | TORSION | | TRACTION | | | FLEXION | |
|---|--|---------------------------------|---|---|-----------------------------------|--|--------------------------------------|
| | Al 2024 T3 *[6-104,] $\mu\text{e/s}$ | Nylon [4-32] $\mu\text{e/s}$ | Al 3105 H14 [8-1781] $\mu\text{e/s}$ | Al 2024 T3 [150-322] $\mu\text{e/s}$ | Nylon [7-2293] $\mu\text{e/s}$ | Al 2024 T3 [130-1150] $\mu\text{e/s}$ | Nylon [1520-4420] $\mu\text{e/s}$ |
| $\sigma_{\text{adhérence glace}}^{\dagger}$ (MPa) | ----- | ----- | 0,46 ± 13% | 0,47 ± 13% | 0,49 ± 18% | ----- | ----- |
| Rugosité, R_a (μm) | 0,49 ± 25% | 0,18 ± 22% | 0,09 ± 11% | 0,10 ± 30% | 0,04 ± 25% | 0,12 ± 8% | 0,46 ± 24% |
| ϵ (μe) | 430 ± 63% | 200 ± 65% | 490 ± 12% | 370 ± 41% | 246 ± 84% | 40 ± 75% | 330 ± 24% |
| $\sigma_{\text{rupt. int. glace}}^{\dagger}$ (MPa) | ----- | ----- | 4,7 ± 9% | 4 ± 50% | 2,5 ± 81% | -0,06 ± 250% | -0,7 ± 114% |
| $\tau_{\text{rupt. int. glace}}^{\dagger}$ (MPa) | 1,26 ± 67% | 0,43 ± 57% | ----- | ----- | ----- | 0,014 ± 36% | 0,06 ± 33% |

* Intervalle du taux de déformation des essais compilés

† Mesurées par centrifugeuse

7.8 EFFET DU SUBSTRAT SUR LES DÉFORMATIONS DE RUPTURE

7.8.1 Effet de la rigidité du substrat

Lors des essais, on a utilisé comme substrat du nylon et de l'aluminium. Le nylon est 5 fois moins rigide que la glace tandis que l'aluminium l'est 7 fois plus. Cette différence de rigidité ne semble avoir aucune influence sur les résultats. Par exemple, en torsion et en traction, la déformation de rupture est moins élevée avec le nylon tandis que, en flexion, c'est l'inverse qui est observé.

7.8.2 Effet de la rugosité du substrat

La rugosité du substrat influence de façon marquée les déformations de rupture en torsion et en flexion et traction. Pour ces modes, plus la rugosité est faible, plus les déformations de rupture sont faibles. Par exemple, en torsion, le nylon est 2,7 fois plus lisse que l'Al et les déformations mesurées y sont 2,2 fois plus faibles. En flexion, c'est l'aluminium qui est 3,8 fois plus lisse que le nylon et la déformation de rupture sur l'aluminium est 8,3 fois plus faible. La rugosité influence de façon marquée la déformation de rupture et par le fait même, influence le cisaillement de rupture ou la contrainte d'adhérence de la glace. En effet, l'augmentation de la rugosité augmente l'adhérence de la glace. C'est la conclusion à laquelle arrive Saito (Saito, 1997) et les travaux de maîtrise reliés à cette thèse portant spécifiquement sur l'adhérence de la glace polycristalline accrétée (Laforte, 2001).

7.9 L'APPLICABILITÉ DES SYSTÈMES DE MATÉRIAUX ACTIFS AU DÉGLAÇAGE

Parmi les trois systèmes étudiés, celui le moins intéressant d'utilisation pour dégeler a été le système pneumatique McKibben. Premièrement, la forme cylindrique du système oblige à

casser la glace par choc mécanique où un bris cohésif de la glace est nécessaire ce qui implique beaucoup d'énergie. Deuxièmement, l'accroissement du diamètre du cylindre produisant le déglaçage équivaut à un pourcentage de déformation de 9%, ce qui est 100 fois plus élevé que les niveaux de déformation mesurés lors des essais en torsion, flexion et traction.

Le système à base du polymère ionique, CPMI, et le système à fibres piézoélectriques, MFC représentent un meilleur potentiel déglaçant; car sous excitation ils produisent une flexion soit le mode de déformation le plus efficace. La membrane ionique qu'on a pu se procurer possède toutefois des caractéristiques électromécaniques aléatoires. De plus, elle possède une restriction d'utilisation importante soit le fait qu'elle doive demeurer humide en tout temps.

La membrane composite de piézoélectrique est le système le plus simple et robuste à utiliser. Cependant, la force développée par le système étudié n'est pas suffisante pour décoller une couche de glace de 2 mm, car la contrainte en cisaillement générée à l'interface y est environ 40 fois trop faible.

7.9.1 Déglaçage par déformation d'une plaque ou d'un câble

À la lumière des résultats obtenus, pour déglaçer une surface plane ou une plaque de faible dimension, le système/matériau devrait déformer la surface par flexion afin de minimiser les contraintes de rupture. Une ondulation suffisamment énergétique, où plusieurs flexions successives sont imposées en continu, serait également favorable au déglaçage.

La tension et la flexion sont difficilement applicables aux câbles aériens compte tenu de leurs longueurs importantes et leurs attaches fixes entre deux portées. La torsion devient donc le mode de déformation à favoriser lors de la conception d'un système de déglaçage applicable aux câbles aériens. De plus, l'efficacité du déglaçage est plus grande lorsque le câble est composé de torons. Contrairement à un câble lisse où le dépôt de glace décolle sans se libérer du câble, un câble toronné se libère du dépôt de glace lorsqu'il est tordu.

Malgré qu'on n'a pas étudié l'effet de la limite élastique, le choix de l'épaisseur du substrat lors de la conception devra la considérer. Le système devra conserver son élasticité avant et après le déglaçage pour ne pas l'endommager de façon permanente. Car lorsque la surface se déglace, la force initialement répartie dans les 2 matériaux devient appliquée au substrat seulement augmentant la contrainte dans le substrat. Plus le substrat est mince, plus la contrainte devient importante.

CHAPITRE 8

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

8. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Cette thèse est le fruit de travaux expérimentaux où ont été mesurées les déformations d'un substrat givré en traction, torsion et flexion sans solliciter directement le dépôt de glace. Ces travaux s'inscrivent dans le cadre d'une étude visant à développer un système déglaçant utilisant des matériaux électrodéformables capables de briser la glace en surface. Plus précisément, on a mesuré expérimentalement sur l'aluminium et le nylon le niveau de déformation produisant le décollement ou le bris de la glace y adhérant. Pour ce faire, trois montages ont été développés ou adaptés spécifiquement pour les besoins de la thèse. Pour chaque type de déformation, 3 épaisseurs de givre dur soit 2, 5 et 10 mm ont été étudiées à -10°C à différents taux de déformation compris entre 8×10^{-6} à $4,4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Sur la base des résultats obtenus, il est possible de tirer les conclusions suivantes.

8.1 DÉFORMATIONS DE RUPTURE

L'objectif principal de la thèse a été atteint. Il a été montré que les déformations de rupture ont été mesurées de façon juste et précise avec des coefficients de variation inférieurs à 10%. La déformation d'un substrat d'aluminium nécessaire au bris de 2 à 10 mm de glace vaut en moyenne $430 \mu\epsilon \pm 63\%$ en torsion, $430 \mu\epsilon \pm 41\%$ en traction et $40 \mu\epsilon \pm 75\%$ en flexion. Pour un substrat de nylon, dans les mêmes conditions, la déformation moyenne est de $200 \mu\epsilon \pm 65\%$ en torsion, $246 \mu\epsilon \pm 84\%$ en traction et $330 \mu\epsilon \pm 24\%$ en flexion.

8.2 CONTRAINTES DE RUPTURE

En torsion et flexion, l'analyse a montré que les contraintes de rupture concordent avec celles de référence. Par contre, en traction, la contrainte de rupture normale moyenne de la glace à l'interface est presque le double de la résistance de la glace en tension de référence. Cette surévaluation semble indiquer la limitation du modèle élastique linéaire utilisé pour le calcul des contraintes qui ne tient pas compte du moment de flexion imposé.

8.3 CONDITIONS FAVORISANT LE DÉGLAÇAGE

Les essais de déglaçage par déformation présentés dans cette thèse ont permis de mesurer des contraintes et des déformations de ruptures dans différentes conditions de déformation, de taux de déformation, d'épaisseurs de glace, de rugosité et de rigidité du substrat. Ces résultats peuvent servir à définir quelques **conditions à satisfaire, facilitant le bris de l'échantillon glacé**, pouvant être utilisables lors de la conception de système/matériau déglaçant.

- ***Critère 1 : Un mode de déformation favorisant la combinaison des contraintes***

À la section précédente, il a été montré que la glace décolle et/ou fissure plus facilement lorsqu'elle est soumise à une combinaison de cisaillement et de contraintes normales. Effectivement, dans les mêmes conditions d'essais, c'est en flexion que les déformations à atteindre pour produire un bris de l'échantillon sont les plus faibles avec seulement 185 $\mu\epsilon$ de déformation (cisaillement combiné) comparativement à 315 $\mu\epsilon$ pour la torsion (cisaillement pur) et 485 $\mu\epsilon$ pour la traction (normales combinées). Ainsi, à la suite de cette étude, pour un

déglaçage efficace, les systèmes devraient être conçus afin de produire un cisaillement combiné à des contraintes normales.

- ***Critère 2 : Un taux de déformation supérieur à $8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ afin que la glace soit dans le régime fragile.***

La déformation de rupture s'est avérée indépendante du taux de déformation, dans la gamme des taux étudiés pour les essais soit de 8×10^{-6} à $4,4 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Toutefois, les montages utilisés n'ont pas permis de travailler à des taux de déformation plus lents, ce qui aurait permis de déterminer la transition ductile-fragile d'une couche de glace accrétée à une surface. Il est toutefois possible d'établir que le dépôt d'une glace polycristalline à $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ se comporte en mode fragile au-dessus du taux de déformation de $8 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

- ***Critère 3 : Une épaisseur de glace de 10 mm***

L'épaisseur de la couche de glace sur le substrat à déformer s'est avérée être un facteur important. De façon générale, plus l'épaisseur de glace est élevée, plus la déformation à la rupture diminue. En torsion et en traction, la déformation diminue de façon inverse à l'épaisseur de glace tandis qu'en flexion la déformation de rupture diminue selon une relation qui reste à identifier. Sur la base des résultats obtenus, le déglaçage d'un dépôt de glace de 10 mm nécessite une déformation moindre que celle d'un dépôt de 5 et 2 mm.

- ***Critère 4 : Un substrat lisse***

En première analyse, à la suite de l'étude, il apparaît que plus la rugosité du substrat est faible, plus les déformations de rupture seront faibles. Effectivement, les essais avec les deux substrats les plus lisses, le nylon en torsion et l'aluminium en flexion ont, donné les déformations de rupture les plus faibles.

8.4 RECOMMANDATIONS

Les principales recommandations découlant de l'étude sont :

- Augmenter le nombre d'essais en traction afin d'améliorer la précision du modèle analytique utilisé.
- Refaire des essais avec des substrats possédant une plus grande différence de rigidité et avec des épaisseurs de glace plus élevées, afin de mieux cerner l'influence de ces facteurs sur les déformations de rupture et déterminer le rapport glace/substrat optimal en fonction de la rigidité du substrat.
- Modéliser par éléments finis les essais de torsion et flexion afin d'approfondir l'étude du comportement mécanique d'un substrat glacé déformé et de définir précisément les lois comportementales de l'échantillon composite.
- Étudier l'approche d'un critère énergétique de déglaçage en fonction des déformations et contraintes de rupture obtenues.

CHAPITRE 9

BIBLIOGRAPHIE

9. BIBLIOGRAPHIE

1. 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.
2. 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.
3. ARCHER, P. et GUPTA, V., (1998), "Measurement and Control of Ice Adhesion to Aluminium 6061 Alloy", *J. Mech. Phys. Solids*, 1998, vol. 46, No. 10, pp. 1745-1771.
4. ASM, (1984), "Metal Handbook Ninth Edition Vol. 2, Properties and Selection: Non Ferrous Alloys and Pure Metals", American Society for Metals, Ohio, 855p.
5. ASTM, (2002), "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics", Designation: D 638-02a, 2002, 14 p.
6. BARTHELAT, F., WU, Z., PROROK, B. C., ESPINOSA, H. D., (2003), "Dynamic Torsion Testing of Nanocrystalline Coatings Using High-Speed Photography and Digital Image Correlation", *Society for Experimental Mechanics*, september 2003, vol. 43, no. 3, 10 p.
7. ASTM, (1996), "Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastics Sheeting", Designation: D 882-91, 1994, 30 p.
8. BAR-COHEN, Y., (1999), "Proceeding of Smart Structures and Materials 1999, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)", SPIE, mars 1999, San Siego, vol. 3669, 415 p.
9. BAR-COHEN, Y., (2001), "Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles", SPIE, first edition, Washington, 671 p.
10. BAR-COHEN, Y., (2002), "Proceeding of Smart Structures and Materials 2002, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)", SPIE, 18-21 mars 2002, San Siego, vol. 4695, 506 p.
11. BARZERGUI, A., BUI-QUOC, T., BIRON, A., McINTYRE, G., LABERGE, C., (1993), "Résistance des matériaux", 2^{ème} édition, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, 595 p.
12. BENSLIMANE, M., GRAVESEN, P., (2002), "Mechanical Properties of Dielectric Elastomer Actuators with smart metallic compliant Electrodes", Proceeding of Smart Structures and Materials 2002, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), SPIE, 18-21 mars 2002, San Siego, vol. 4695, pp. 150-157.

13. BERNIER, P.-L., (2002), “*Simulation d'un système de déglaçage utilisant des matériaux électroactif*”, Université du Québec à Chicoutimi, Rapport de Stage-Projet 1, août 2002, 46 p.
14. BILODEAU, J., (1996), “*Étude des propriétés mécaniques en cisaillement de la glace atmosphérique*”, Mémoire de maîtrise, UQAC, 1996, 94 p.
15. 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, 5 p.
16. BORGMAN, H., (2004), “*Actuators 2004: Proceeding of International Conference on a New Actuators*”, Bremen, Allemagne, june 14-16 2004, 844 p.
17. BRAILOVSKI, V., PROKOSHKIN, S., TERRIAULT, P., TROCHU, F., (2003), “*Shape Memory Alloys: Fundamentals, Modeling and Applications*”, Editions ETS, July 2003, 844 p.
18. BROUSSOUX, D., et al., (1992), “*Device for Removal of the Ice Formed on the Surface of a Wall, Notably an Optical or Radio-Electrical Window*”, U.S. Patent No 5,172,024.
19. CHEN, Z.-Y., et al., (2002), “*Electromechanical Properties and Molecular Conformation in P(VDF-TrFE)-based terpolymer*”, Proceeding of Smart Structures and Materials 2002, Electroactive Polymer Actuators and Devices(EAPAD), SPIE, 18-21 mars 2002, San Siego, vol. 4695, pp. 167-175.
20. CHOU, C.P., HANNAFORD, B., (1994), “*Static and Dynamic Characteristics of McKibben Pneumatic Artificial Muscles*”, Proceeding IEEE, International Conference on Robotic and Automation, 1994, pp. 281-286.
21. CROUTCH, V. K., HARTLEY, R. A., (1992). “*Adhesion of Ice to Coating and the Performance of Ice Release Coating*”, Journal of Coatings Technologies, 1997, vol. 64, no. 815, pp. 41-52.
22. DE ROSSI, D., MAZZOLDI, A., (1999), “*Linear Fully Dry Polymer Actuator*”, Proceeding of Smart Structures and Materials 1999, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), SPIE, mars 1999, San Siego, vol. 3669, pp. 35-40.
23. DESMEULES, P., (1992), “*Rapport sur le Verglas du 5 janvier 1992; Circuit 735 kV (lignes 7027-7028-7029)*”, Rapport Interne Hydro-Québec, 8 p.
24. DOI, M. et al., (1992), “*Deformation of Ionic Polymer Gels by Electric Field*”, Macromolecules, 1992, vol. 25, pp. 5504-5511.

25. FINKE, R.C., BANKS, B.A., (1985), "Piezoelectric De-icing Device", U.S. Patent No. 4,545,553.
26. GERARDI, J., INGRAM, R., CATARELLA, R., (1995), "Wind Tunnel Test Results for a Shape Memory Alloy Based De-Icing System for Aircraft", International Icing Symposium '95, pp. 101-112.
27. GROSS, S. J., et al., (1999), "Mechanical Load Effects on the Electrostrictive Strain of P(VDF-TrFE) Copolymer and the Development of High Resolution Hydrostatic-Pressure Dilatometer", IEEE Ultrasonic Symposium, 1999, vol. 2, pp. 1019-1023.
28. GOLD, L.W., (1658), "Some Observations on the Dependence of Strain on Stress for Ice", Canadian Journal of Physic, vol. 36, 1958, pp.1265-1275.
29. GOLD, L. W., (1977), "Engineering Properties of Fresh-water Ice", Journal of Glaciology, vol. 19, no. 81, 1977, pp. 197-212.
30. HAWKES, I., MELLOR, M., (1972), "Deformation and fracture of ice under uniaxial stress", Journal of Glaciology, vol. 11, no. 61, pp. 103-131.
31. JELLINEK, H. H. G., (1959), "Adhesive Properties of Ice". Journal of Colloid Science, vol. 14, 1959, pp. 268-280.
32. JELLINEK, H. H. G., (1962), "Ice Adhesion", Canadian Journal of Physics, vol. 40, 1962, pp. 1294-1309.
33. KHAN, I. M., HARRISON, J. S., (1999), "Field Responsive Polymers: Electroresponsive, Photoresponsive and Responsive Polymers in Chemistry and Biology", ACS Symposium series 726, American Chemical Society, Washington DC, 1999, 361 p.
34. KLUTE, G.K. et al., (1999), "Artificial Muscles: Pneumatic Actuators with Biomedical Intelligence", International Conference on Advance Intelligent Mechatronics, AIM'99, Atlanta, septembre 1999.
35. KUROIWA, D., (1965), "Icing and Snow Accretions on Electric Wires", CRREL Research Report 123.
36. LAFLAMME, J.N., LAFORTE, J-L., ALLAIRE, M-A., (2002), "De-icing Technics Before, During, and Following Ice Storms", Rapport No. T003700-3303, The Canadian Electricity Consortium, mars 2002, 150 p.
37. LAFORTE, C. AND LAFORTE, J.L., (2002), "How a Solid Coating Can Reduce Ice Adhesion on Structures?", Proceedings of the 10th International Workshop of Atmospheric Icing of Structures, Brno, Czech Republic, june 2002.

38. LAFORTE, C., (2001), “*Étude de l’adhérence de la glace sur des solides à caractères glaciophobes*”, Mémoire de maîtrise, UQAC, septembre 2001, 148 p.
39. LAFORTE, C., BEISSWENGER, A., (2005), “*Icephobic Material Centrifuge Adhesion Test*”, 11th International Workshop of Atmospheric Icing on Structure, Montreal, june 2005.
40. LAFORTE, J-L., ALLAIRE, M-A., ASSELIN, D., (1994), “*État de l’art du déglaçage 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.
41. LAFORTE, J.L., ALLAIRE, M.A., ST-LOUIS, M., (2001), “*Full-Scale Testing at an Outdoor Experimental Site of a De-Icing System to be Applied to Power Line Ground Cable*”. Proceedings of the 4th International Symposium on Cable Dynamics, Vol. Mai, pp. 325-330.
42. LANDY, M., FREIBERGER, A., (1967), “*Study of Ice Adhesion*”, Journal of Colloid Interface Science, 1967, vol. 25, , pp. 231-244.
43. LOSS, T.A.E, et al., (1998), “*Composite poly p-phenylenevinylene-Nafion Thin Film*”, Can. J. Chem., 1998, pp. 1554-1558.
44. MADDEN, J., (2004), “*Properties of electroactive polymer actuators*”, Proceedings of ACTUATOR 2004., Bremen, 14-16 june 2004, pp. 338-3342.
45. MANITOBA HYDRO, (1994); “*Mechanized Ice Roller*”, Research and Development at Manitoba Hydro, Technical Information T147, 1 p.
46. MARTIN, C.A. PUTT, J.C., (1992), “*Advanced Pneumatic Impulse Ice Protection System (PIIP) for Aircraft. Journal of Aircraft*”, Engineering Notes, Vol. 29, No. 4, pp. 714-716.
47. MICHEL, B., (1978), “*Ice Mechanics*”, Les Presses de l’Université Laval, Québec, 1978, 484 p.
48. MINSK, L. D., (1982), “*How are Ice phobic coatings*”, Atmospheric Icing on Structure, Proceeding of the First, vol. 1, no. 1, 1982, pp. 93-95.
49. MULHERIN, N.D., DONALDSON, R.J.F., (1988), “*Removal of Atmospheric Ice from Broadcast Towers Using Low-Frequency, High-Amplitude Vibrations*”, 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Stuctures, pp. 405-410.
50. OKADA, T., et al., (1998), “*Ion and Water Transport Characteristics of Nafion membranes as electrolytes*”, Electrochimica Acta, vol. 43, no. 24, pp. 3741-3747.

51. OTERO, T.F., SANSINENA, J.M., "Artificial Muscles based on Conducting Polymers", Bioelectrochemistry and Bioenergetics, 1995, vol. 38, pp. 411-414.
52. OTERO, T.F., SANSINENA, J.M., (1997), "Bilayer Dimensions and Movement in Artificial Muscles", Bioelectrochemistry and Bioenergetics, 1997, vol. 42, pp. 117-122.
53. OUNAIRES, Z., PARK, C., HARRISON, J.S., SMITH, J.G., HINKLEY, J., (1999), "Structure-property Study of Piezoelectricity in polyimides", Proceeding of Smart Structures and Materials 1999, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), SPIE, mars 1999, San Diego, vol. 3669, pp. 171-178.
54. PELRINE, R., et al., (2002), "Dielectric Elastomer Artificial Muscle Actuators: Toward Biomimetic Motion", Proceeding of Smart Structures and Materials 2002, Electroactive Polymer Actuators and Devices(EAPAD), SPIE, 18-21 mars 2002, San Diego, vol. 4695, pp. 126-137.
55. PETRENKO, V.F., (1994), "The Effect of the Static Electric Fields on Ice Friction", Journal of Applied Physics, Vol. 76, No. 2, pp. 1216-1219.
56. RAMANATHAN, S., et al., (2002), "De-icing of Helicopter Blades Using Piezoelectric Actuators", Proceeding of Smart Structures and Materials 2000: Smart Electronics and MEMS, mars 2000, vol. 3990, pp. 281-286.
57. RIAHI MATBOU, M., (2007), "Numerical and Experimental Studies of the Mechanical Behavior at the Ice/Aluminium Interface", Mémoire de maîtrise, UQAC, fevrier 2007, 157 p.
58. RICKA, J., TANAKA, T., (1984), "Swelling of Ionic Gels: Quantitative Performance of the Donnan Theory", Macromolecules, 1984, vol. 17, pp. 2916-2921.
59. SAITO, H., TAKAI, K., YAMAUCHI, G., (1997), "Water- and Ice-repellent Coatings", Surface Coatings International, vol. 80, no. 4, 1997, pp. 168-171.
60. SCAVUZZO, R., CHU, M., (1994), "Ice Fracture Toughness from Peel Tests", Proceeding of International Icing Symposium '95, 18-21 septembre 1995, pp. 303-314.
61. SHAHINPOOR, M., BAR-COHEN, Y., XUE, T., HARRISON, J.S., SMITH, J., (1999), "Ionic Polymer-Metal Composites as Biomimetic sensors and Actuators-Artificial Muscles", American Chemical Society, 1999, 452 p.
62. SOMMER-LARSEN, P., et al., (2002), "Performance of Dielectric Elastomer Actuators and Materials", Proceeding of Smart Structures and Materials 2002, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)., SPIE, 18-21 mars 2002, San Diego, vol. 4695, pp. 158-166.

63. Services Scientific Technical and Cultural, (2000), “*Adhesion testing of coating surface*”, Final report, Prime minister’s Affairs, Belgique, 2000, 68 p.
64. 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.
65. VELAZQUEZ MORALEZ, P., (2000), “*Étude des polymères électroactifs comme outils potentiels de déglaçage d'un réseau de transport électrique*”, Université du Québec à Chicoutimi, Rapport de recherche, 28 p.
66. WAX, S.G., SANDS, R.R., (1999), “*Electroactive Polymer Actuators and Device*”, Proceeding of Smart Structures and Materials 1999, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)”, SPIE, mars 1999, San Siego, vol. 3669, pp. 2-10.
67. WEI, Y., et al., (1996), “*Ice/metal interfaces: Fracture Energy and Fractography*”, Journal of Materials Science, 1996, vol. 31, pp. 943-947.
68. WHITE, E. V., (2005), “*Proceeding of Smart Structures and Materials 2005, Industrial and Commercial Application of Smart Structures Technologies*”, SPIE, mars 2005, vol. 5762, 322 p.
69. XU, HEAL, (2001), “*Ferroelectric and Electromechanical Properties of poly(vinylidene-fluoride-trifluoroethylene-chlorotrifluoroethylene) terpolymer*”, Applied Physics Letters, 2001, vol. 78, no. 16, pp. 2360-2362.
70. YAMAMOTO, T., et al., (1990), “*A Countermeasure for Snow Accumulation by Method to Melt Snow on the Transmission Line Conductors*”, 5th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, pp. B7-4(1-4).
71. 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.
72. ZHANG, Q.M., et al., (1998), “*Giant Electrostriction and Relaxor Ferroelectric Behavior in Electron-Irradiated Poly(vinylidene fluoride-trifluoroethylene) Copolymer*”, Science, 1998, vol. 280, pp. 2101-2103.

ANNEXE 1 : Matériels et protocoles

| | |
|---|----|
| 1 : Mesure de l'adhérence de la glace | A2 |
| 2 : Détermination des déformations de rupture par traction givrée | A4 |
| 3 : Détermination des déformations de rupture par torsion givrée | A6 |
| 4 : Détermination des déformations de rupture par flexion givrée | A8 |

1. Mesure de l'adhérence de la glace

Matériel :

Eau déminéralisée
 7 échantillons
 Support à échantillons pour glaçage
 Appareil de mesure d'adhérence par force centrifuge
 Balance électronique
 Pied à coulisse

Préparation des échantillons :

La poutre et le contrepoids sont fabriqués avec de l'aluminium 6061-T6. Les dimensions de la poutre sont 3,18 cm x 33,97 cm x 0,48 cm d'épais. La poutre nécessite un double polissage avec un disque de conditionnement de surface « BLENDDEX » grosseur « fin » en passant deux fois, soit un aller-retour de chaque côté de la poutre. Les dimensions du contrepoids sont de 3,8 x 3,2 x 0,2 cm, sa masse est de 5,5 g (incluant l'adhésif). En effet, pour fixer le contrepoids sur la poutre, on utilise un morceau de collant 3M® (adhérant des deux côtés), ayant les mêmes dimensions que le contrepoids.

Givrage des échantillons et préparation à la série d'essais :

La chambre climatique utilisée est l'une des chambres disponibles au LIMA. Il s'agit de la chambre froide de 4 mètres de hauteur utilisée pour les simulations expérimentales de précipitations verglaçantes avec des gouttelettes de diamètre volumique médian, **DMV**, de l'ordre de 200 μm .

Peser chaque poutre à l'aide d'une balance analytique préalablement installée dans la chambre climatique réfrigérée depuis au moins une demi-heure. Ensuite, mettre au niveau le support servant au glaçage avec l'outil prévu à cette fin, de façon à ce que la surface à glacer soit directement sous le gicleur. Insérer les poutres dans le support de glaçage et mettre l'assemblage dans la chambre à bruine verglaçante de manière à ce que les poutres soient parallèles à la fenêtre. Coller le thermocouple sur une des poutres.

Démarrer le programme de la chambre climatique, attendre que la température de l'air et des poutres soit de -8°C et démarrer les précipitations selon les conditions décrites au **Tableau A1**. La température de formation moyenne lue sur le thermocouple posé sur l'échantillon doit être comprise entre $-3,2$ et $-3,8^\circ\text{C}$. La glace obtenue (environ 5,5 g ou environ 1 cm d'épaisseur) est translucide (givre lourd). Attendre 29 minutes de précipitation : arrêter l'émission d'eau, arrêter le programme de la chambre et faire imprimer le graphique du glaçage. Reprogrammer la chambre à -10°C . Enlever les poutres du support et attendre environ 1 heure pour que la température des poutres revienne à -10°C . Avant les essais, mesurer l'aire de

glace sur la poutre à l'aide du pied à coulisse. Repeser les poutres glacées pour obtenir la masse de glace de l'échantillon.

Tableau A1 : Paramètres du givrage pour les essais d'adhérence

| Paramètres | | |
|--------------------------------|------|--------------------|
| Type de précipitations | | Bruine verglaçante |
| Températures (T) | | |
| T échantillons avant givrage | °C | -8 ± 1 |
| T air, T _a | °C | -8,0 ± 0,5 |
| | | |
| Générateur de précipitations | | |
| Type d'eau | | Déionisée |
| Embout du gicleur | | 4002 |
| Temps des gicleurs | s | ON=0,3 OFF=0,9 |
| Diamètre dekg gouttes, DVM | µm | 200 ± 25 |
| Fréquence de l'oscillateur | Hz | 60 (1 vent.) |
| Intensité des précipitations | mm/h | 6 |
| Temps de précipitation approx. | min | 29 |

L'essai d'adhérence :

Mettre une poutre sur l'arbre de la centrifugeuse à l'aide des pièces de fixations. Fermer le couvercle de la centrifugeuse et s'assurer de bien fermer le loquet. Relier le filage de la centrifugeuse à l'ordinateur placé à l'extérieur et ouvrir le programme de la centrifugeuse. Appuyer sur le bouton démarrer et attendre l'arrêt automatique de la centrifugeuse lors du décollement de la glace. La page des résultats peut être affichée et imprimée pour garder en dossier. Enregistrer les données. Répéter pour chaque échantillon. Noter l'apparence de la surface déglacée afin de déterminer la nature du bris d'adhérence.

2. Détermination des déformations de rupture par traction givrée

Matériel :

Amplificateur de signal 3800 Wide Range, Instruments Division, Measurements Group, #036939
 Amplificateur de signal P3500, Instruments Division, Measurements Group, #034157
 Presse ATS, Applied Test Systems, inc., 15 A, 60 Hz, A860896-6-87
 Ordinateur PCB 486 G (programme Coldroom)
 Ordinateur, DAT 143288, #046206 (acquisition de données)
 Perceuse Dewalt DW953, Type 1, 12 V, #34310
 Batterie Dewalt, 12 V, DW9072
 Clé dynamométrique, Mastercraft, #58-8655-8
 Contrôleur de précipitation Gralab 645, #045255
 Réfrigérateur Danby, D1707 W, #06663181
 Micromètre digital, Mitutoyo Corporation, Numéro de code 500-322, modèle CD-8", #7068156
 Chambre climatique à précipitation givrante (9m)
 Eau déminéralisée

Procédures :

- Ajuster la température de la chambre froide à -10°C de la chambre à bruine verglaçante.*
- Dans la chambre froide, placer l'échantillon, librement sur les mors parfaitement centrés. se refroidir suffisamment longtemps (minimum 30 minutes) pour que l'échantillon atteigne la température de glaçage.
- Mettre le signal du ou des amplificateurs de signal à zéro.
- Mettre les blocs d'acier (deuxième partie du système d'attache) et visser chaque côté en Z en commençant avec la perceuse et terminer avec la clé (s'assurer qu'elle est réglée à 200 lb/f).
- Faire un préétirement d'environ $+500\ \mu\text{e}$ (nylon), $+120\ \mu\text{e}$ (aluminium 3105 H14 et 2024 T3) à basse vitesse.
- Placer les gabarits de glaçage (afin d'empêcher la formation de glace sur l'ensemble de la presse) et débuter les précipitations selon les conditions fournies au **Tableau A2**. Le temps de précipitation varie selon l'épaisseur de glace désirée (environ 23 minutes pour 5 mm). Vérifier en cours de précipitation.
- Lorsque la glace a l'épaisseur désirée, arrêter la précipitation. Pendant ce temps, démarrer le logiciel Quicklog sur l'ordinateur d'acquisition: Lorsque le temps de repos est écoulé (une demie heure) enlever les 2 panneaux troués.
- Noter le pré-étirement de chaque amplificateur de signal
- Mesurer la longueur glacée à l'aide d'un micromètre et noter sur la feuille.
- Remettre le signal des deux amplificateurs à zéro.
- Sélectionner la vitesse désirée à l'intérieur de la chambre froide, sur l'extrémité de la presse (1 à 10) puis sur le module extérieur (L-M-H).

* Se référer à la procédure interne du laboratoire (LIMA) PRO-1006

- Lorsque tout est prêt pour l'essai, démarrer l'acquisition. Rapidement, appuyer sur le bouton DOWN du module de contrôle de la presse en vérifiant la lecture de la déformation sur l'amplificateur de signal. Procéder à l'étirement jusqu'à : 8000 $\mu\epsilon$ (incluant le préétirement) pour le nylon, 2000 $\mu\epsilon$ pour l'aluminium 3105 H14 et 5000 $\mu\epsilon$ pour l'aluminium 2024 T3. Ces valeurs correspondent à la déformation maximum en régime élastique. Arrêter l'acquisition, enregistrer les valeurs et effectuer la fiche d'essai à l'aide du logiciel Excel.
- Photographier l'échantillon avec l'appareil photo numérique et prendre en note les observations (décollement, endroit des fissures, etc.)

Tableau A2 : Paramètres du givrage pour l'essai de traction givré

| <i>Paramètre</i> | | |
|-------------------------------------|------|----------------------------|
| <u>Type de précipitations</u> | | Pluie verglaçante |
| Températures (T) | | |
| T_{eau} | °C | ≥ 4 |
| T_{air}, T_a | °C | $-10,0 \pm 0,5$ |
| <u>Générateur de précipitations</u> | | |
| Type d'eau | | Déionisée |
| Embout du gicleur | | 11001 |
| Temps des gicleurs | s | ouverture=0,4 arrêt=0,9 |
| Ventilateurs | Hz | 40 |
| Intensité des précipitations | mm/h | 18 |

3. Détermination des critères de déglaçage par torsion givrée

Matériel :

Strain gage conditionner – 2120A, Instrument Division (Measurements Group) #037048

Torque sensor, OMEGA TQ 103-1.5K

Source 0-50 Volts, Heathkit regulated L.V. Power Supply

Moteur HP 1/20, 90 volts DC, F/L RPM 60, Bison Gear & Engineering Corp. #037103

Appareil à torsion, Tinius Olsen Testing Machine Co. – Willow Grove.Pa #004963

Balance BP6100 Sartorius

Red gage oil – 0.826 specific gravity, Dwyer Instruments Inc.

Ordinateur PCB 486 G (programme Coldroom)

Ordinateur, DAT 143288, #046206 (acquisition de données)

Carte d'acquisition de données PCI-6025E · National Instruments Corp.

ASSY18 180950-01D REV.D5 SC2070

Contrôleur de précipitation Gralab 645, #045255

Réfrigérateur Danby, D1707 W, #06663181

Support à échantillons cylindriques tournants

Chambre à climatique à précipitation givrante (9m)

Eau déminéralisée

Procédures :

- Ajuster la température à -10°C de la chambre à bruine verglaçante. *
- Placer les trois échantillons dans la chambre froide, installés sur le support rotatoire. Installer les panneaux et laisser refroidir suffisamment longtemps (minimum 30 minutes) pour que l'échantillon atteigne la température de glaçage.
- Débuter les précipitations selon les conditions fournies au **Tableau A3**. Le temps de précipitation varie selon l'épaisseur de glace désirée (1h45 pour 5mm). Vérifier en cours de précipitation à l'aide d'un pied à coulisse préalablement refroidie.
- Lorsque la glace a l'épaisseur désirée, arrêter la précipitation et remettre la ventilation au maximum d'intensité. Lorsque le temps de repos est écoulé (45 min) enlever les 2 panneaux.
- Mesurer la longueur glacée à l'aide d'une règle et mesurer l'épaisseur de chaque cylindre à cinq endroits répartis également sur la longueur et noter dans le cahier de laboratoire.
- Insérer le cylindre givré dans les attaches de l'appareil à torsion et brancher la jauge de déformation.
- Ajuster à zéro tous les appareils de mesures.
- Sélectionner la vitesse désirée à l'intérieur de la chambre froide sur la source d'alimentation.
- Préparer une affiche avec le numéro du cylindre, de série et la date. Faire un pré enregistrement vidéo de cette pancarte d'environ 3 s afin d'identifier le vidéo.

* Se référer à la procédure interne du laboratoire (LIMA) PRO-1006

- Lorsque tout est prêt pour l'essai, démarrer l'acquisition avec l'ordinateur dans un programme d'interface VB programmé pour cette fonction et gérer l'acquisition.
- Simultanément, démarrer l'enregistrement vidéo et chronométrer le temps requis avant l'apparition de fissure ou du décollement (visible par un changement de couleur à l'interface). Prendre en note ce temps dans le cahier de laboratoire.
- L'arrêt et l'enregistrement du fichier s'effectuent automatiquement lorsque la jauge indique une déformation voulue soit 2000 μe . Compléter la fiche d'essai à l'aide du logiciel Excel.
- Photographier l'échantillon avec l'appareil photo numérique et prendre en note les observations (décollement, endroit des fissures, etc.) dans le cahier de laboratoire.

Tableau A3: Paramètres du givrage pour l'essai de torsion givré

| Paramètre | | |
|------------------------------|--------------------|----------------------------|
| Type de précipitations | Pluie verglaçante | |
| Températures (T) | | |
| T_{eau} | $^{\circ}\text{C}$ | ≥ 5 |
| T_{air}, T_a | $^{\circ}\text{C}$ | $-8,0 \pm 0,5$ |
| Générateur de précipitations | | |
| Type d'eau | | Déionisée |
| Embout du gicleur | | 11001 |
| Temps des gicleurs | s | ouverture=0,9 arrêt=0,5 |
| Ventilateurs | Hz | 25 |

4. Détermination des déformations de rupture par flexion givrée

Matériel

Montage fabriqué au laboratoire pour mesurer l'adhérence de la glace*
 Amplificateur de signal P3500, Instruments Division, Measurements Group, #034157
 Ordinateur PCB 486 G (programme Coldroom)
 Ordinateur, DAT 143288, #046206 (acquisition de données)
 Carte d'acquisition de données PCI-6025E · National Instruments Corp.
 ASSY18 180950-01D REV.D5 SC2070
 Contrôleur de précipitation Gralab 645, #045255
 Réfrigérateur Danby, D1707 W, #06663181
 Support à échantillon

Procédures

- Ajuster la température à -10°C de la chambre à bruine verglaçante.[†]
- Placer les 10 échantillons (5 nylon, 5 aluminium) dans la chambre froide, installés sur le support et laisser refroidir suffisamment longtemps (minimum 30 minutes) pour que les échantillons atteignent la température de glaçage.
- Débuter les précipitations selon les conditions fournies au Tableau A4 Le temps de précipitation varie selon l'épaisseur de glace désirée (45 min pour 5mm). Vérifier en cours de précipitation à l'aide d'un pied à coulisse préalablement refroidie.
- Lorsque la glace a l'épaisseur désirée, arrêter la précipitation et remettre la ventilation au maximum d'intensité et attendre 45 min.
- Mesurer la longueur glacée à l'aide d'une règle et mesurer l'épaisseur de chaque échantillon à cinq endroits répartis également sur la longueur et noter dans le cahier de laboratoire.
- Insérer doucement l'échantillon givré dans l'encastrement
- Ajuster à zéro tous les appareils de mesures
- Sélectionner la vitesse désirée sur l'interface VB à : 200 Hz, vitesse minimum
 - 500 Hz, vitesse moyenne
 - 800 Hz, vitesse maximum
- Lorsque tout est prêt pour l'essai, démarrer l'acquisition et l'essai avec l'ordinateur.
- L'arrêt de l'essai et l'enregistrement du fichier s'effectuent automatiquement lorsque la vis a parcouru l'aller-retour.
- Photographier l'échantillon avec l'appareil photo numérique et prendre en note les observations (décollement, endroit des fissures, etc.) dans le cahier de laboratoire.

Tableau A4 : Paramètres du givrage de l'essai de flexion givrée

* Décris dans la procédure interne du laboratoire PRO-M008

† Se référer à la procédure interne du laboratoire (LIMA) PRO-1006

| <i>Paramètre</i> | | |
|-------------------------------------|----|----------------------------|
| Type de précipitations | | Pluie verglaçante |
| Températures (T) | | |
| T_{eau} | °C | $\cong 5$ |
| T_{air}, T_a | °C | $-10,0 \pm 0,5$ |
| Générateur de précipitations | | |
| Type d'eau | | Déionisée |
| Embout du gicleur | | 11001 |
| Temps des gicleurs | s | ouverture=0,5 arrêt=0,5 |
| Ventilateurs | Hz | 10 |

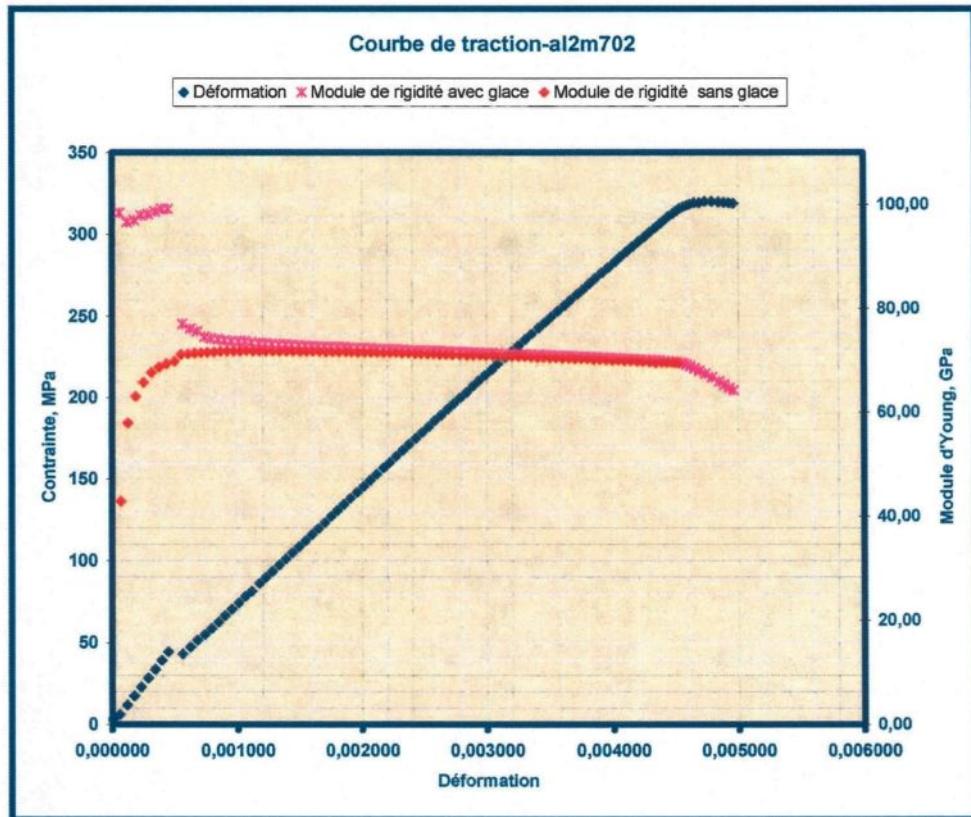
ANNEXE 2 : Exemple de fiche d'essai et sa description pour l'essai de traction givré

Exemple de fiche d'essai et sa description pour l'essai de traction givré

Un exemple de fiche d'essai est présenté à la page suivante. La fiche d'essai contient une section d'information sur l'essai : la date, le numéro de l'essai, le nom du fichier, le matériau substrat et la température d'essai. Elle contient également de l'information sur la glace telle que la longueur glacée sur le substrat, l'épaisseur et la densité de la couche de glace, et le taux de déformation déterminé directement avec les valeurs de la jauge mesuré avant le décollement. Le graphique nommé, courbe de traction, montre la courbe de couleur bleu foncé de la contrainte (MPa) en fonction de la déformation de l'échantillon givré. La déformation est la mesure directe de la jauge tandis que la contrainte est la force mesurée divisée par la section du substrat. Deux autres courbes complètent ce graphique soit les courbes modules de d'Young (GPa) de l'échantillon sans glace (en rouge) préalablement mesurés et celle de l'échantillon givré (en rose). La comparaison de ces deux dernières permet d'évaluer le niveau de décollement atteint en fonction de la déformation imposée. Lorsque la glace est totalement décollée de l'échantillon, la rigidité atteint celle de la rigidité du substrat. Le module n'est pas calculé conventionnellement par la pente de l'ensemble des points mais plutôt point par point.

FICHE D'ESSAI
TRACTION D'UNE LAME GIVRÉE D'ALUMINIUM 2024 T3
TABLEAUX DES DONNÉES

| | | | |
|-------------|--------------------------|---|---------------|
| Essai | 1 | Longueur glace(mm) | 82,00 |
| Date | 14/04/2004 | e_{glace} (mm) | 2,00 |
| Nom fichier | al2m702 | Vitesse de déf. (s ⁻¹) | 4,05E-04 |
| Matériau | Aluminium 2024 T3 | ρ_{glace} ($\pm 0,02$ g/cm ³) | 0,90 |
| Temp. air | -10,0 °C ($\pm 0,1$ °C) | Manipulateur | Émilie Harvey |



OBSERVATIONS: _____

ANNEXE 3 : Exemple de fiche d'essai pour l'essai de torsion givré

Exemple de fiche d'essai pour l'essai de torsion givré

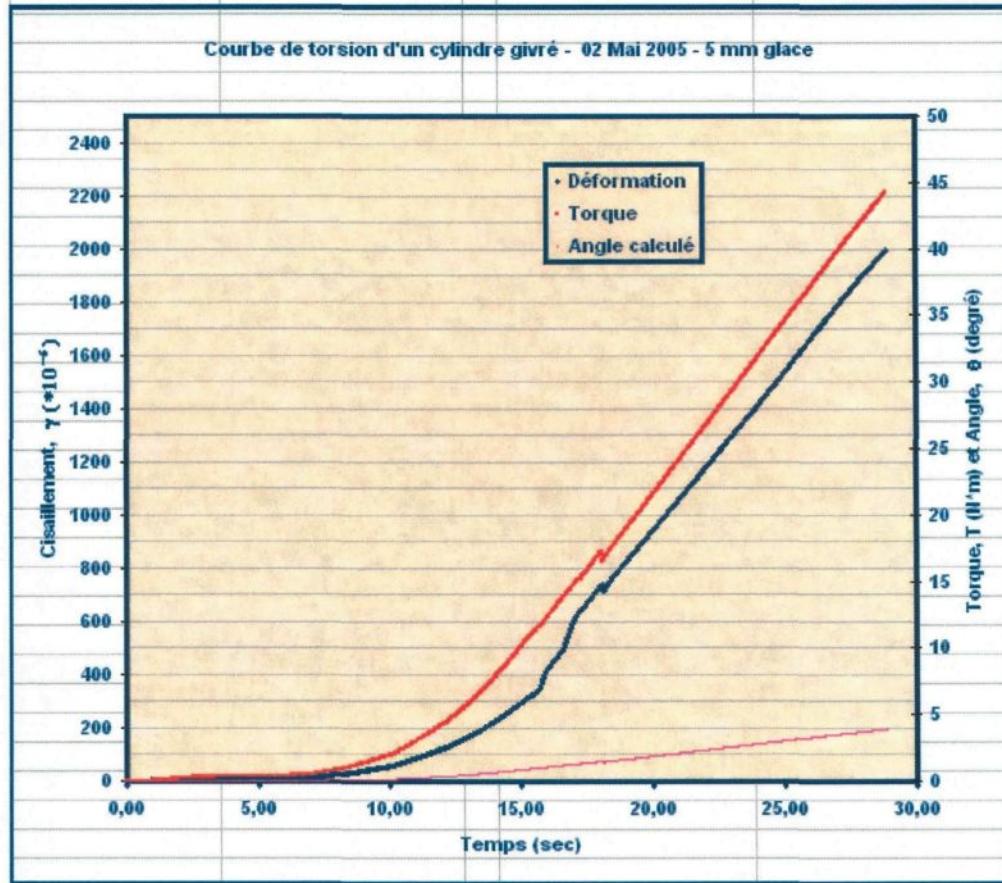
Un exemple de fiche d'essai est présenté à la page suivante. La fiche d'essai contient les détails des conditions d'essai : la date, le numéro de l'essai dans la journée, le nom du fichier, le matériau substrat et la température d'essai. Elle contient également de l'information sur la glace telle que la longueur glacée sur le substrat, l'épaisseur et la densité de la couche de glace et le taux de déformation déterminé directement avec les valeurs de la jauge avant le décollement. Le graphique nommé courbe de torsion d'un cylindre givré montre les données acquises lors de l'essai en fonction du temps. Trois (3) courbes sont présentées soit :

- La courbe en rouge correspondant au couple (N.m) inscrit sur l'axe d'ordonnées secondaire (droite)
- La courbe en bleu foncé correspondant à la déformation en cisaillement ($\mu\gamma$) mesurée directement par la jauge inscrite sur l'axe d'ordonnée principale (gauche)
- La courbe en rose correspondant à l'angle calculé selon le couple mesuré et les caractéristiques du cylindre substrat.

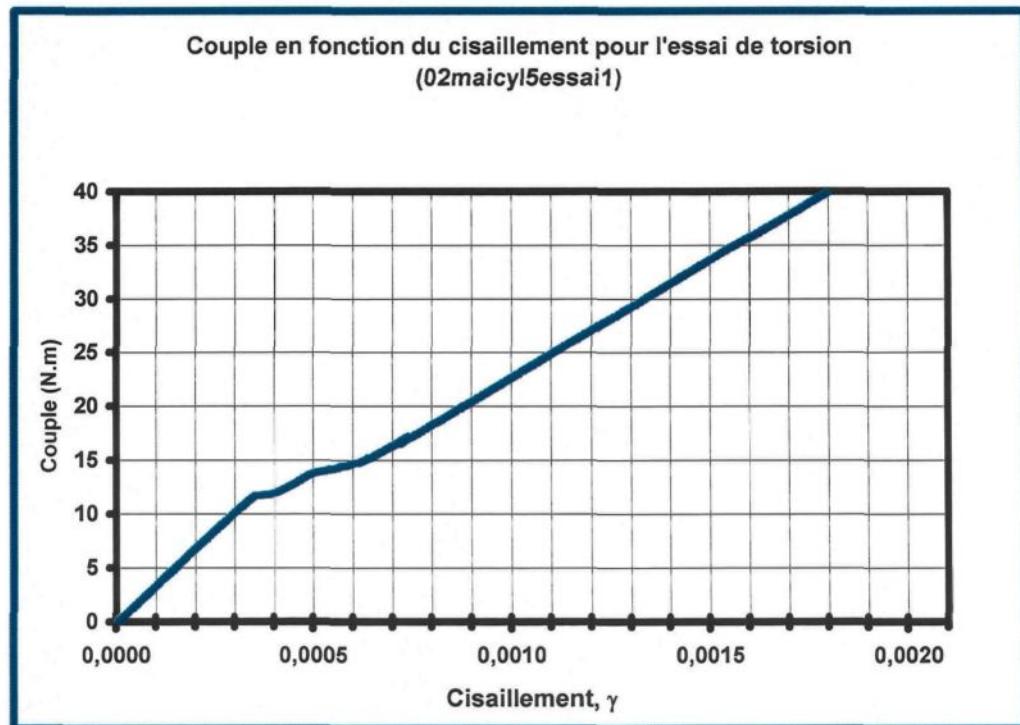
À noter que le temps entre le début de l'acquisition et le départ des courbes est dû à la mauvaise synchronisation manuelle entre le déclenchement de l'acquisition et le déclenchement de l'appareil de torsion. Un deuxième graphique complète la fiche d'essai en présentant la courbe du couple mesuré en N.m en fonction du cisaillement mesuré à l'interface par la jauge de déformation. À partir de cette courbe, il est possible de déterminer la déformation de rupture. Effectivement, la perte de rigidité provoquée par la fissuration et/ou le décollement de la glace provoque par le fait même un changement de pente visible. L'exemple présenté est celui de l'essai : 02maicyl5essai effectué avec 5 mm de glace. Sur ce graphique, la déformation de rupture correspond à un cisaillement de 0,000350.

FICHE D'ESSAI
TORSION D'UN CYLINDRE GIVRÉ D'ALUMINIUM 2024 T3
TABLEAUX DES DONNÉES

| | | | |
|------------------|--------------------------|---|---------------|
| Essai / Cylindre | #1 / #5 | Longueur glace(mm) | 210,00 |
| Date | 02/05/2005 | e_{glace} (mm) | 4,44 |
| Nom fichier | 02maicy1essai1 | Taux de cisaillement (s^{-1}) | 7,31E-05 |
| Matériau | Aluminium 2024 T3 | ρ_{glace} ($\pm 0,02$ g/cm 3) | |
| Temp. air | -10,0 °C ($\pm 0,1$ °C) | Manipulateur | Diane Paradis |

OBSERVATIONS:

Vitesse maximum, 2000 de déformation
 Fissure observée après environ 15,06 secondes
 Cette valeur a été chronométrée visuellement en même temps que l'essai
 1^{ère} fissure apparaît à gauche (côté moins épais) et prends environ 1 seconde pour apparaître à droite. Ensuite, un décollement à droite a été remarqué.



ANNEXE 4 : Exemple de fiche d'essai pour l'essai de flexion givré

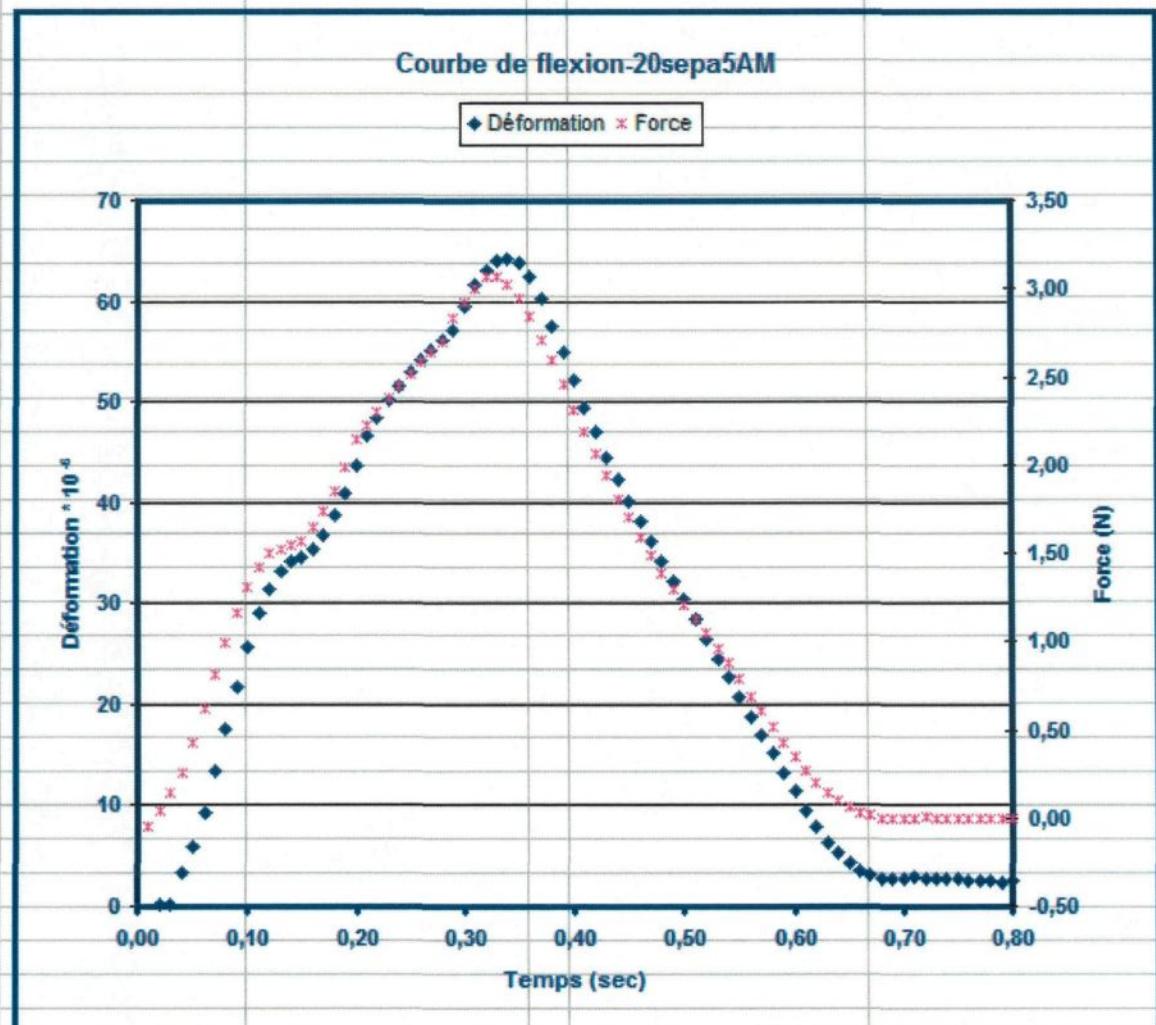
Exemple de fiche d'essai pour l'essai de flexion givré

Les résultats des essais de flexion givrés sont inclus dans une fiche d'essai semblable à celles des essais présentés précédemment. La fiche d'essai contient une section d'information sur l'essai : la date, le numéro de l'essai dans la journée, le nom du fichier, le matériau substrat et la température d'essai ainsi que de l'information sur la glace telle que la longueur glacée sur le substrat, l'épaisseur et la densité de la couche de glace et la vitesse de déformation déterminée directement avec les valeurs de la jauge mesurées avant le décollement. Le graphique nommé courbe de flexion suivie du nom de l'essai présente deux courbes des données mesurées directement lors de l'essai en fonction du temps. Celle de couleur bleu foncé présente la déformation mesurée du substrat, tandis que celle de couleur rose est composée des mesures de la force de flexion (N). Les contraintes normales et en cisaillement à l'interface lors du décollement sont présentées en fonction de la déformation dans un second graphique présenté à la page suivante. Le graphique est présenté en trois couleurs afin de faciliter son analyse. L'information en **noir** est générale et relative aux deux courbes de contraintes. Le **bleu foncé** est utilisé pour les valeurs de contraintes normales affichées sur l'axe d'ordonnée principale (à gauche) tandis que le **rouge foncé** est utilisé pour les valeurs de contraintes en cisaillement affichées sur d'ordonné secondaire (à droite). Les deux lignes horizontales correspondent au niveau de contrainte nulle. Le signe (positif ou négatif) de la pente de la courbe de la contrainte normale dépend de la nature de cette contrainte soit en compression ou en tension. Une photo de l'échantillon brisé complète les résultats.

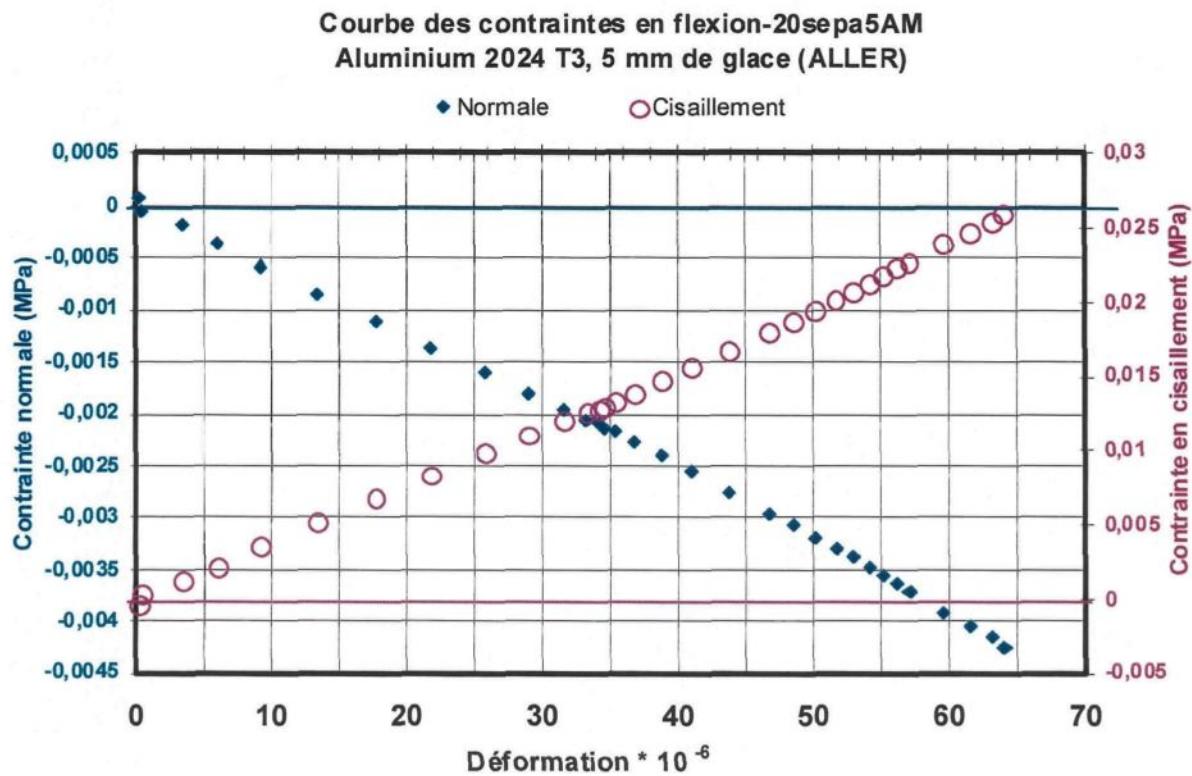
FICHE D'ESSAI
FLEXION D'UNE POUTRE GIVRÉE D'ALUMINIUM 2024 T3

TABLEAUX DES DONNÉES

| | | | |
|-------------|--------------------------|---|------------------|
| Essai | 1 | Longueur glace (m) | 0,254 |
| Date | 2005-09-20 | e_{glace} (m) | 0,0053 |
| Nom fichier | 20sepa5AM.txt | Vitesse de déf. (s ⁻¹) | 1,846E-04 |
| Matériau | Aluminium 2024 T3 | ρ_{glace} ($\pm 0,02$ g/cm ³) | 0,88 |
| Temp. air | -10,0 °C ($\pm 0,1$ °C) | Manipulateur | Caroline Laforte |



OBSERVATIONS:



ANNEXE 5 : Exemple de calcul de la contrainte normale pour l'essai de traction givré

Exemple de calcul de la contrainte normale pour l'essai de traction givré**TITRE:**

Exemple de calcul de la contrainte normale de rupture dans la glace à l'interface pour l'essai de traction givré: al2m705 (Aluminium 2024 T3, 5 mm de glace, vitesse moyenne)

CONSTANTES:

$$E_g := 9900000000 \text{ Pa} \quad E_g = 9.9 \cdot 10^9 \text{ Pa}$$

DONNÉES DE L'ESSAI

$$\varepsilon_r := 0.000390$$

CALCULS

$$\sigma_{rglace} := \varepsilon_r \cdot E_g$$

$$\sigma_{rglace} = 3.86 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

**ANNEXE 6 : Exemple de calcul de la contrainte en cisaillement pour
l'essai de torsion givré**

Exemple de calcul de la contrainte en cisaillement pour l'essai de torsion givré

TITRE:02/05/5/1

Exemple de calcul de la contrainte en cisaillement de rupture dans la glace à l'interface pour l'essai de torsion givré d'un cylindre d'Al 2024 T3 de 5 mm de glace à vitesse moyenne
(GRAPHIQUE ANNEXE 3)

CONSTANTES:

$$\text{Module de cisaillement de la glace } G_g := 3800000000 \text{ Pa}$$

$$\text{Module de cisaillement de l'aluminium } G_{al} := 29000000000 \text{ Pa}$$

DONNÉES DE L'ESSAI

$$\text{Diamètre intérieur du cylindre d'Al } R_{intalu} := 0.007835 \text{ m}$$

$$\text{Diamètre extérieur du cylindre d'Al } R_{extalu} := 0.00955 \text{ m}$$

$$\text{Épaisseur de la glace } e_{glace} := 0.00444 \text{ m}$$

$$\text{Torque mesuré à la rupture } T := 12.1 \text{ N}\cdot\text{m}$$

CALCULS

Moment polaire glace, J_g

$$J_g := \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \left[(R_{extalu} + e_{glace})^4 - (R_{intalu})^4 \right]$$

$$J_g = 4.711 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

Moment polaire de l'alu, J_{al}

$$J_{al} := \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot (R_{extalu}^4 - R_{intalu}^4)$$

$$J_{al} = 7.146 \cdot 10^{-9} \text{ m}^4$$

Torque dans la glace, T_g

$$T_g := \frac{T \cdot (G_g \cdot J_g)}{G_g \cdot J_g + G_{al} \cdot J_{al}}$$

$$T_g = 5.608 \text{ J}$$

Cisaillement dans la glace à l'interface

$$\tau_g := \frac{(T_g \cdot R_{extalu})}{J_g}$$

$$\tau_g = 1.137 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

ANNEXE 7 : Exemple de calcul des contraintes pour l'essai de flexion givré

Exemple de calcul des contraintes pour l'essai de flexion givré

TITRE:

Exemple de calcul des contraintes normales et en cisaillement de rupture dans la glace à l'interface pour l'essai de flexion givré selon:
20sepa4AM (Aluminium 2024 T3, 5 mm de glace, vitesse moyenne)

CONSTANTES:

$$\text{Module de rigidité de la glace } E_g := 9900000000 \text{ Pa}$$

$$\text{Module de rigidité de l'aluminium } E_{al} := 71000000000 \text{ Pa}$$

DONNÉES DE L'ESSAI

$$\text{Épaisseur de la glace } e_g := 0.00509 \text{ m}$$

$$\text{Épaisseur de l'aluminium } e_{al} := 0.00197 \text{ m}$$

$$\text{Largeur de la glace } b_g := 0.0250 \text{ m}$$

$$\text{Largeur de l'aluminium } b_{al} := 0.0250 \text{ m}$$

$$\text{Longueur glacée } l_g := 0.254 \text{ m}$$

$$\text{Force appliquée ou l'effort tranchant } P := 1.60 \text{ N}$$

CALCULS

$$\text{Rapport des modules } n := \left(\frac{E_g}{E_{al}} \right) \quad n = 0.139$$

$$\text{Aire de la section de l'aluminium } A_{al} := b_{al} \cdot e_{al} \quad A_{al} = 4.925 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$\text{Aire de la section de glace équivalente } A_{gequi} := n \cdot b_g \cdot e_g \quad A_{gequi} = 1.774 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$\text{Axe neutre de l'aluminium } y_{al} := \frac{e_{al}}{2} \quad y_{al} = 9.85 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$\text{Axe neutre de la glace } y_g := e_{al} + \left(\frac{e_g}{2} \right) \quad y_g = 4.515 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{Axe neutre de la poutre glacée } y_c := \frac{A_{gequi} y_g + A_{al} y_{al}}{A_{gequi} + A_{al}} \quad y_c = 1.92 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Moment d'inertie de la poutre glacée

$$I := \frac{(b_{al} \cdot e_{al}^3)}{12} + \frac{(n \cdot b_g \cdot e_g^3)}{12} + A_{gequi} \cdot (y_c - y_g)^2 + A_{al} \cdot (y_c - y_{al})^2$$

$$I = 2.168 \cdot 10^{-10} \text{ m}^4$$

Moment de flexion

$$M := P \cdot \frac{1}{2} g$$

$$M = 0.203 \text{ J}$$

Contrainte normale à l'interface de la glace

$$\sigma_{int} := \frac{-M \cdot (e_{al} - y_c) \cdot n}{I} \quad \sigma_{int} = -6.545 \cdot 10^3 \text{ Pa}$$

Moment statique lorsqu'il y a 5 mm de glace

$$Q := b_g \cdot n \cdot e_g \left[\left(\frac{e_g}{2} \right) + (e_{al} - y_c) \right] \quad Q = 4.605 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$$

Cisaillement à l'interface

$$\tau_{int} := \frac{P \cdot Q}{I \cdot b_{al}}$$

$$\tau_{int} = 1.359 \cdot 10^4 \text{ Pa}$$

ANNEXE 8 : Exemple de calcul des contraintes à partir de la force pour l'essai de traction

(feuille de calcul *Maple*)

Exemple de calcul des contraintes à partir de la force pour l'essai de traction

> with(linalg):

Définition des dimensions caractéristiques :

ESSAI: 5M7ess2

Longueur de la plaque : L (mm)

Longueur de glace : Lg (mm)

Longueur sans glace : Lsg (mm) (sur chaque coté)

Largeur de la plaque : b (mm)

Épaisseur du substrat : ts (mm)

Épaisseur de la glace : h (mm)

Épaisseur de la glace : tg (mm) (fonction arbitraire sur la longueur de glace)

> L:=166.0; Lg:=85.00; b:=18.78; ts:=0.42; h:=5.6; Lsg:=(L-Lg)/2;

L := 166.0

Lg := 85.00

b := 18.78

ts := 0.42

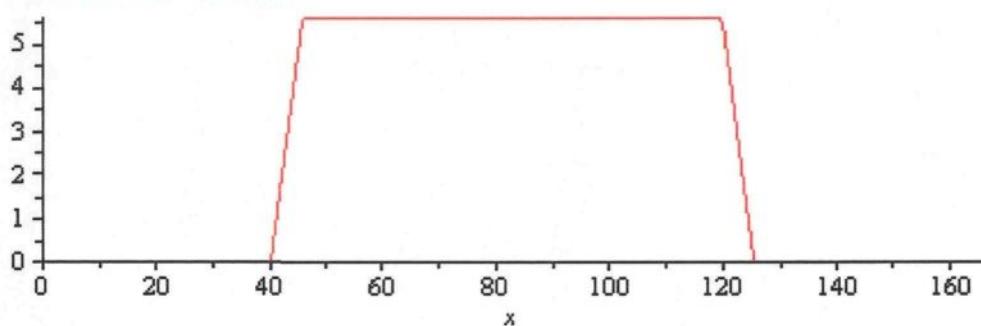
h := 5.6

Lsg := 40.5000000

> tg:=(x)->piecewise(x>=0 and x<Lsg, 0, x>=Lsg and x<Lsg+h, x-Lsg, x>=Lsg+h and x<Lsg+Lg-h, h, x>=Lsg+Lg-h and x<L-Lsg, -x+L-Lsg, x>=L-Lsg and x<=L, 0);

tg := $x \rightarrow \begin{cases} 0 & \text{if } 0 \leq x < Lsg \\ Lsg & \text{if } x \geq Lsg \text{ and } x < Lsg + h \\ h & \text{if } x \geq Lsg + h \text{ and } x < Lsg + Lg - h \\ h & \text{if } x \geq Lsg + Lg - h \text{ and } x < L - Lsg \\ -x + L - Lsg & \text{if } L - Lsg \leq x \leq L \\ 0 & \text{if } x <= L \end{cases}$

> plot(tg(x), x=0..L);



Propriétés mécaniques :

Module d'Young de la glace : Eg (MPa)

Module de Coulomb de la glace : Gg (MPa)

Module de Young du substrat : Es (MPa)

Module de Coulomb du substrat : Gs (MPa)

> Eg:=9.9e3; Gg:=3.8e3; Es:=71e3; Gs:=29e3;

$$\begin{aligned}
 Eg &:= 9900. \\
 Gg &:= 3800. \\
 Es &:= 71000 \\
 Gs &:= 29000
 \end{aligned}$$

Équivalence en glace :

> $n := Es/Eg;$

$$n := 7.17171717$$

Calcul des propriétés de la section (en glace) :

Aire : A (mm²)

Centroïde (p/r à la base) : yc (mm)

Moment d'inertie : Iz (mm⁴)

Moment statique à l'interface : Qz (mm³)

> $A := (x) \rightarrow n * b * ts + b * tg(x);$

$$A := x \rightarrow n b ts + b tg(x)$$

> $yc := (x) \rightarrow (n * b * ts * (ts/2) + b * tg(x) * (ts + tg(x)/2)) / A(x);$

$$yc := x \rightarrow \frac{n b ts \frac{1}{2} ts + b tg(x) \left(ts + \frac{1}{2} tg(x) \right)}{A(x)}$$

> $Iz := (x) \rightarrow n * (b * ts^3 / 12 + b * ts * (ts/2 -$

$yc(x))^2 + b * tg(x) * 3 / 12 + b * tg(x) * (ts + tg(x)/2 - yc(x))^2);$

$$\begin{aligned}
 Iz := x \rightarrow n &\left(\frac{1}{12} b ts^3 + b ts \left(\frac{1}{2} ts - yc(x) \right)^2 \right) + \frac{1}{12} b tg(x)^3 \\
 &+ b tg(x) \left(ts + \frac{1}{2} tg(x) - yc(x) \right)^2
 \end{aligned}$$

> $Qz := (x) \rightarrow b * tg(x) * (ts + tg(x)/2 - yc(x));$

$$Qz := x \rightarrow b tg(x) \left(ts + \frac{1}{2} tg(x) - yc(x) \right)$$

Calcul des efforts internes sur la longueur selon l'hypothèse que la force P passe par le centroïde de la plaque

Force de traction : P (N)

Effort normal : N (N)

Moment fléchissant : M (N-mm) : $M := (x) \rightarrow P * (yc(x) - ts);$

> $P := 310.977;$

$N := (x) \rightarrow P;$

$M := (x) \rightarrow P / ts * \text{int}(yc(x) - t, t=0..ts);$

$V := (x) \rightarrow -\text{diff}(M(x), x);$

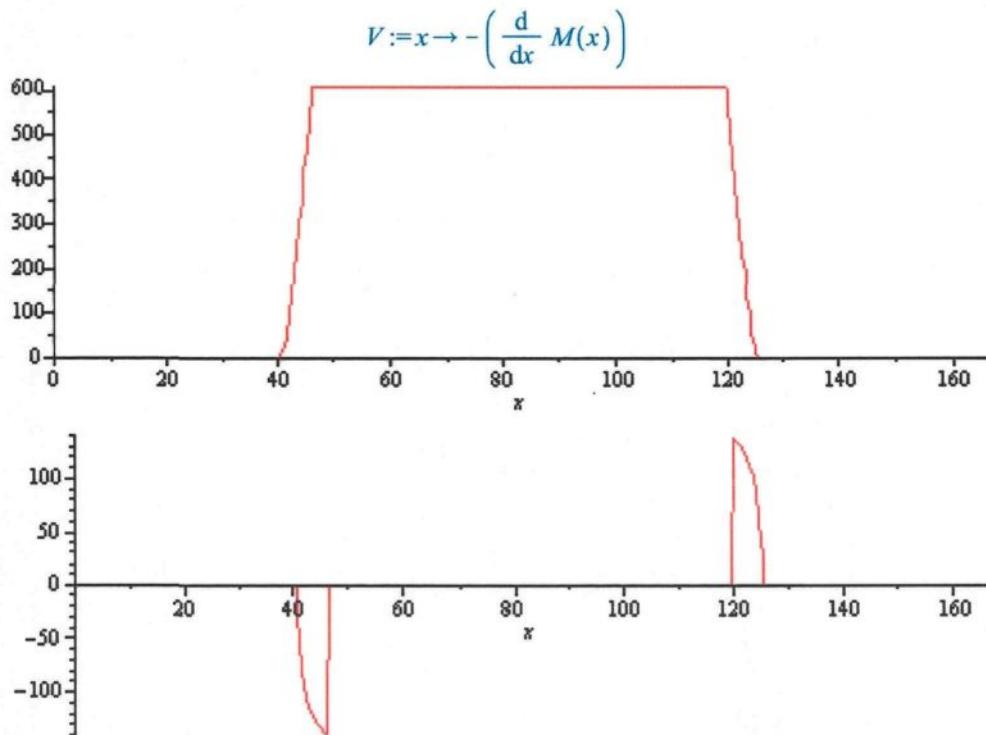
$\text{plot}(M(x), x=0..L);$

$\text{plot}(V(x), x=0..L);$

$$P := 310.977$$

$$N := x \rightarrow P$$

$$M := x \rightarrow \frac{P \left(\int_0^{ts} (yc(x) - t) dt \right)}{ts}$$



Calcul de la contrainte normale résultante (sigx, p/r au centroïde yc)

Fibre inférieure : y_b (mm)

Interface : y_i (mm)

Fibre supérieure : y_t (mm)

Contrainte normale: σ_{xg} (MPa)

```

>  $y_b := (x) \rightarrow -yc(x)$ ;  $y_i := (x) \rightarrow y_b(x) + ts$ ;  $y_t := (x) \rightarrow y_i(x) + tg(x)$ ;
 $\sigma_{xg} := (x, y) \rightarrow N(x) / A(x) - M(x) * y / Iz(x)$ ;
 $\sigma_{xg} := (x, y) \rightarrow \text{piecewise}(y \geq y_b(x) \text{ and}$ 
 $y \leq y_i(x), n * \sigma_{xg}(x, y), y \geq y_i(x) \text{ and } y \leq y_t(x), \sigma_{xg}(x, y))$ ;
 $y_b := x \rightarrow -yc(x)$ 
 $y_i := x \rightarrow y_b(x) + ts$ 
 $y_t := x \rightarrow y_i(x) + tg(x)$ 
 $\sigma_{xg} := (x, y) \rightarrow \frac{N(x)}{A(x)} - \frac{M(x) y}{Iz(x)}$ 
 $\sigma_{xg} := (x, y) \rightarrow \text{piecewise}(y_b(x) \leq y \text{ and } y \leq y_i(x), n * \sigma_{xg}(x, y),$ 
 $y_i(x) \leq y \text{ and } y \leq y_t(x), \sigma_{xg}(x, y))$ 

```

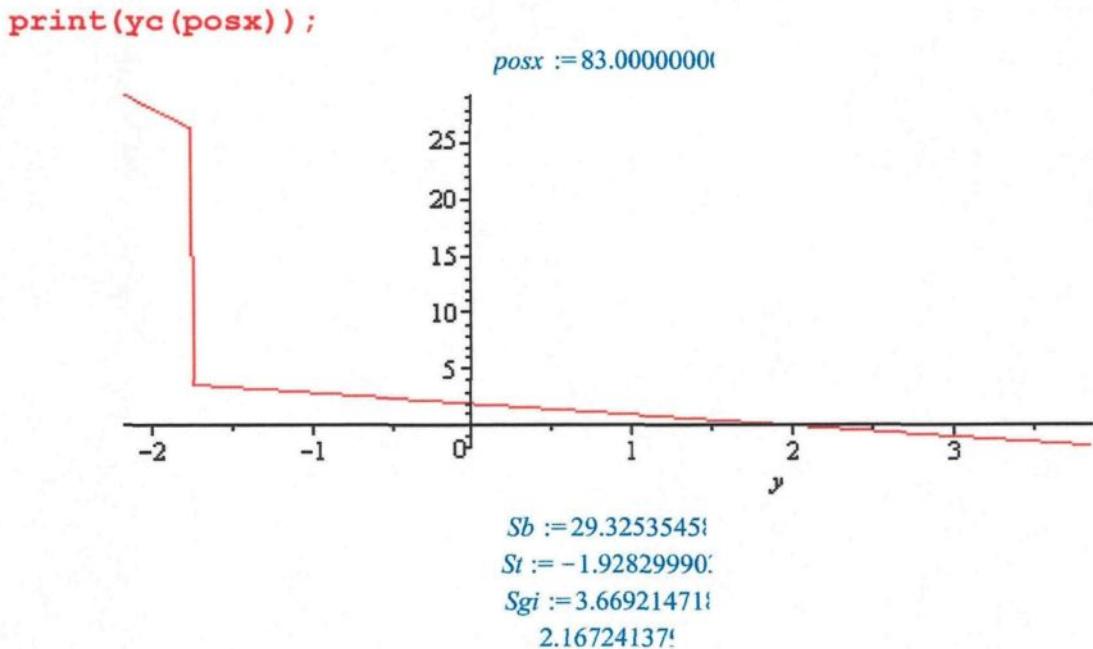
Distribution de la contrainte normale dans une section quelconque

La position selon x : posx (mm)

```

> posx := L/2;
plot(sigx(posx, y), y=yb(posx) .. yt(posx));
Sb := sigx(posx, yb(posx));
St := sigx(posx, yt(posx));
Sgi := sigx(posx, yi(posx));

```



Évaluation des contraintes dans la glace à l'interface

```

> SgiN:=N(L/2)/A(L/2);
SgiM:=-M(L/2)*yi(L/2)/Iz(L/2);
SsiN:=SgiN*n;
SsiM:=SgiM*n;
SsbM:=-M(L/2)*yb(L/2)/Iz(L/2)*n;

```

$S_{giN} := 1.92274879$
 $S_{giM} := 1.74646592$
 $S_{siN} := 13.7894105$
 $S_{siM} := 12.5251596$
 $S_{sbM} := 15.5359440$

Calcul de la déformation à la jauge (ue)

```

> EpsJaugeb:=Sb/Es*1e6;
EpsJaugebN:=SsiN/Es*1e6;

```

$EpsJaugeb := 413.033163$
 $EpsJaugebN := 194.217050$

Calcul du flux de cisaillement à l'interface due à la variation du moment fléchissant

Flux de cisaillement : q_{yx} (N/mm) (unique à l'interface)

Contrainte de cisaillement dans la glace : τ_{yxg} (MPa)

Contrainte de cisaillement dans le substrat : τ_{yxS} (MPa)

```

> qyxi:=(x)->V(x)*Qz(x)/Iz(x);
tauyxgi:=(x)->qyxi(x)/b;
tauyxsi:=(x)->n*tauyxgi(x);
plot(qyxi(x),x=0..L);
plot(tauyxgi(x),x=0..L);
plot(tauyxsi(x),x=0..L);

```

$$qyxi := x \rightarrow \frac{V(x) \ Qz(x)}{Iz(x)}$$

$$tauyxgi := x \rightarrow \frac{qyxi(x)}{b}$$

$$tauyxsi := x \rightarrow n \ tauyxgi(x)$$

