

CHAPITRE 4
MONTAGES ET MESURES EXPÉRIMENTALES

[McCours.com](https://www.mccours.com)

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 cm² 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 :

$$F = mr\omega^2 \quad \text{Équation 4-1}$$

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:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{Équation 4-2}$$

Où :

A = surface de l'échantillon de glace (m²)

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.

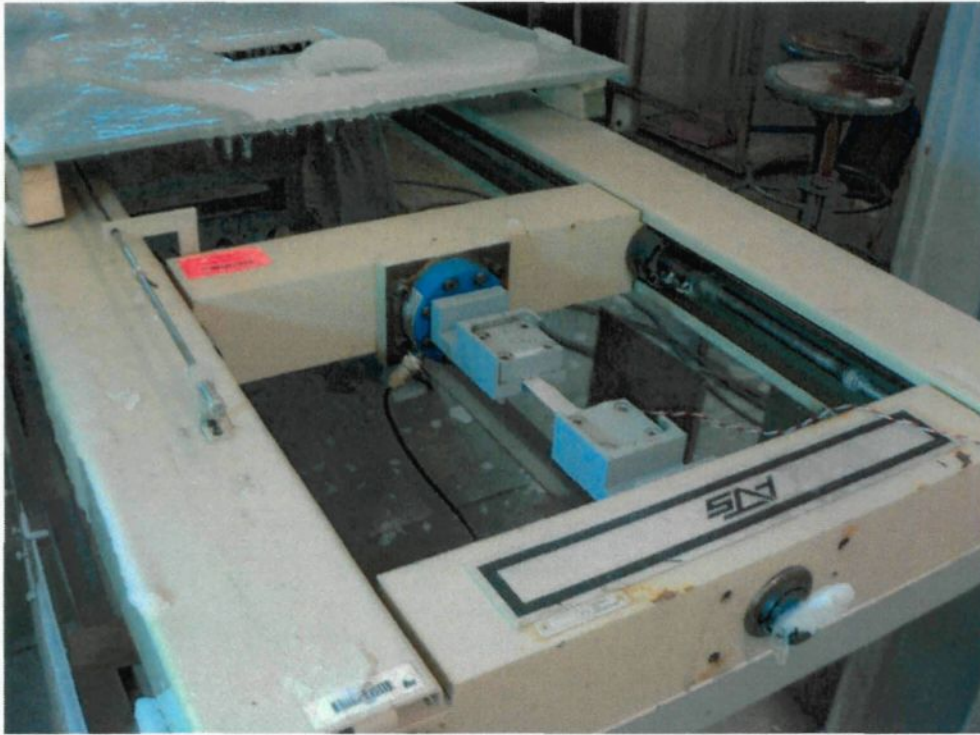


Figure 4-2 : Montage de l'essai de traction givré

Dans l'essai de traction givré, 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 jauges 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.

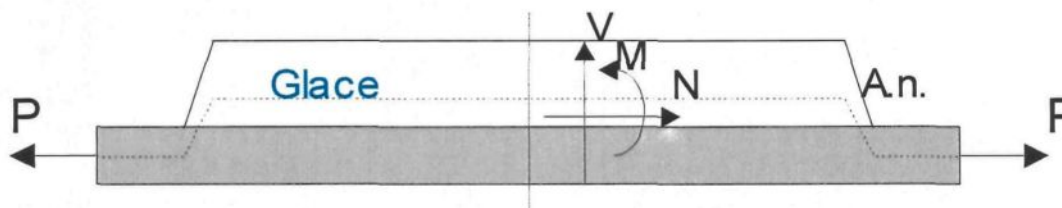


Figure 4-3 : Schéma de chargement : essai de traction

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 $\epsilon_{\text{rupt.}}$, 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 m/s ² b _{subst.} = largeur du substrat (m) e _{subst.} = épaisseur du substrat (m)
$E_{\text{hétérogène}}$ Module d'Young (MPa)	$E_{\text{hétérogène}} = \frac{\sigma_{\text{appliquée}}}{\epsilon_{\text{mesurée}}}$	$\sigma_{\text{appliquée}}$ = (MPa) $\epsilon_{\text{mesurée}}$ = lecture de la jauge
$\sigma_{\text{rupture int. glace}}$ (MPa)	Si : <ol style="list-style-type: none"> 1. $\epsilon_{\text{glace}} = \epsilon_{\text{substrat}}$ 2. $\sigma_{\text{axiale}} \gg \sigma_{\text{laterale}}$ 3. Échantillon n'est pas endommagé avant la rupture Alors : $\sigma_{\text{rupt. int. glace}} = \epsilon_{\text{rupt.}} \cdot E_g$	$E_g = 9\,900$ MPa $\epsilon_{\text{rupt.}}$ = 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 déglacement prématuré. 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.

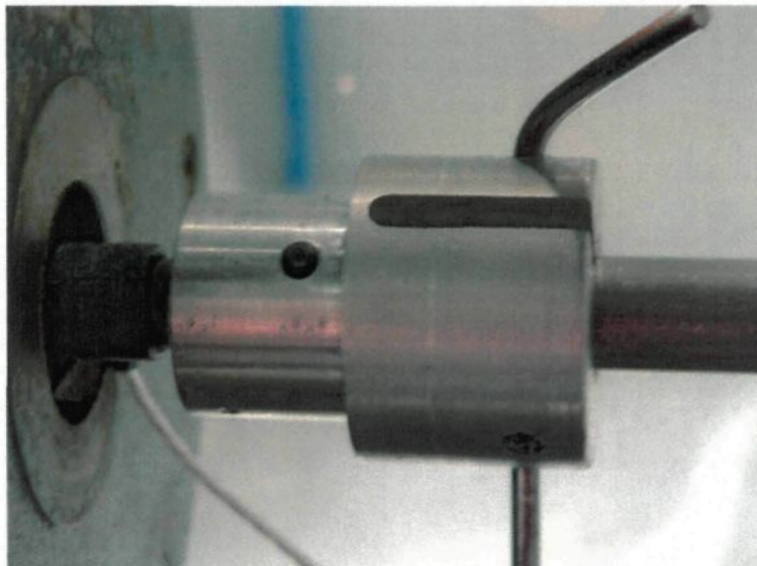


Figure 4-5 : Manchon d'attache de l'échantillon avec goupille de fixation

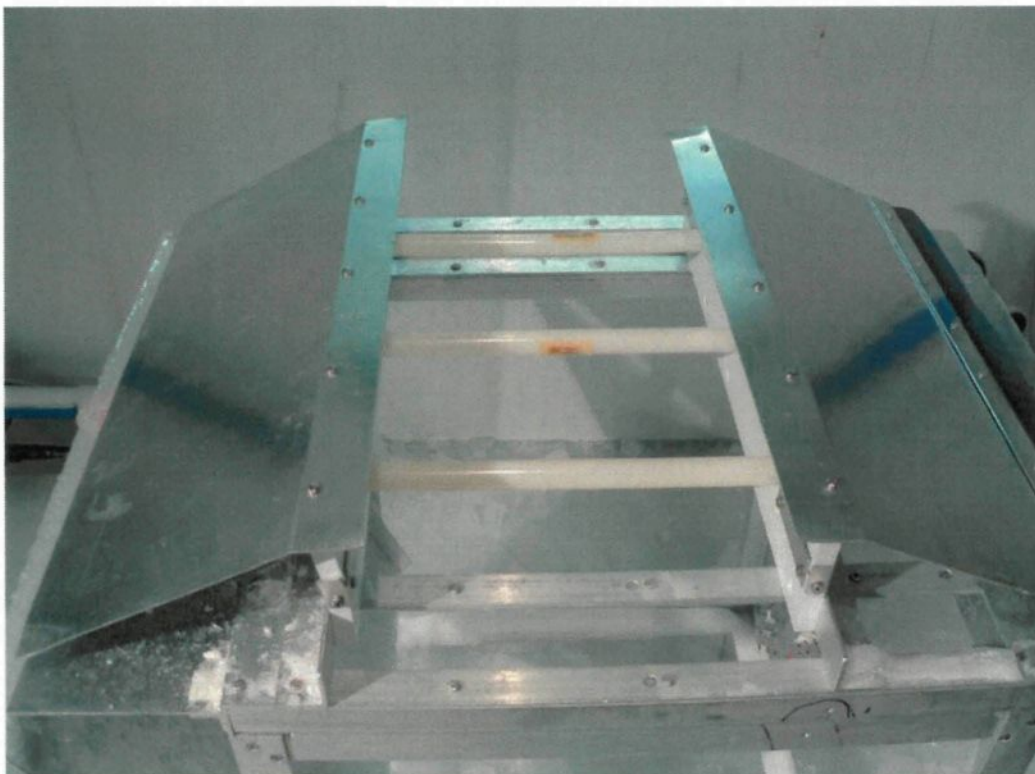


Figure 4-6 : Support de glaçage pour l'essai de torsion

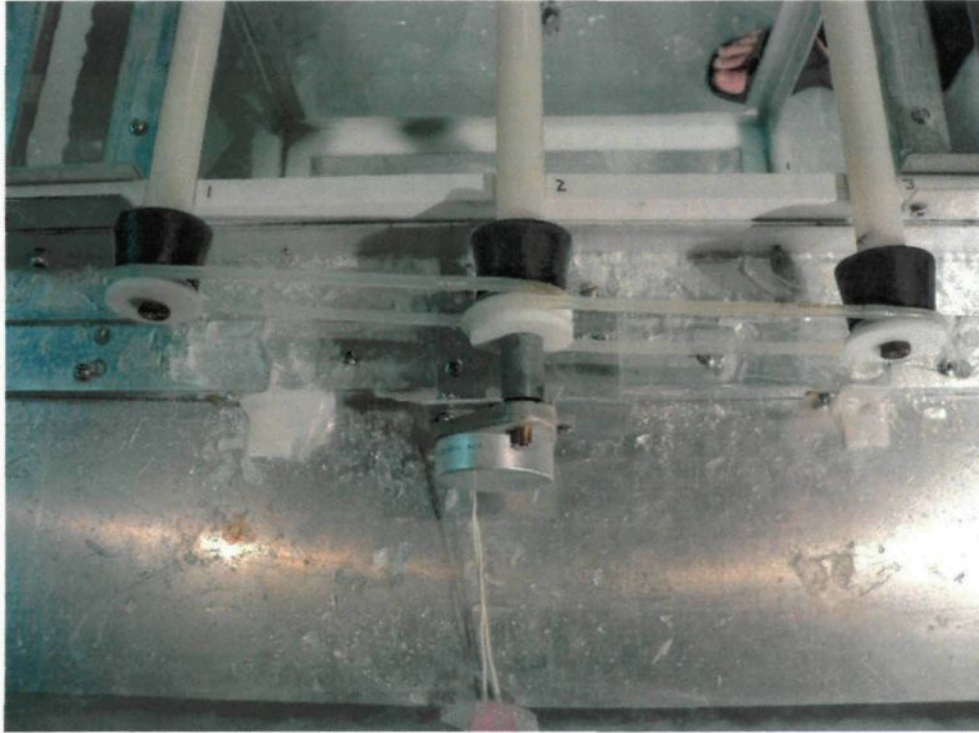


Figure 4-7 : Motorisation de la table de glaçage

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 jauges 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.

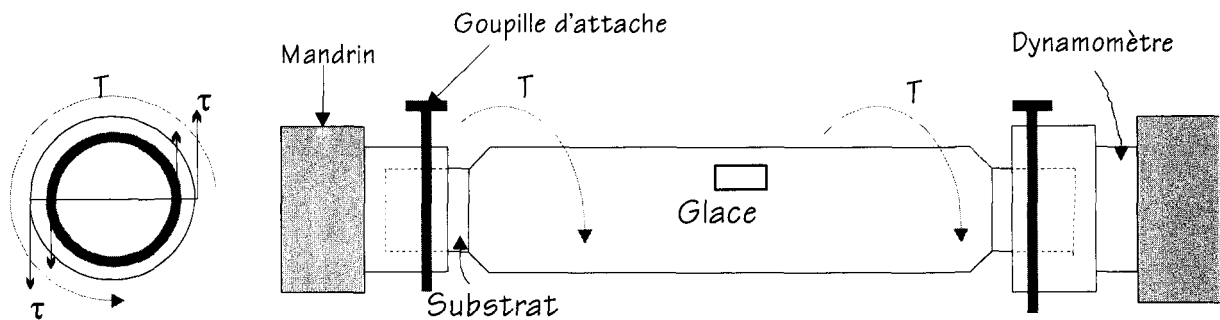


Figure 4-8 : Schéma de chargement : essai de torsion

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 (m⁴)

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 :

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

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

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

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

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

Où :

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

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

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

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

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

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)	$J_s = \frac{\pi}{2} (r_{exts}^4 - r_{ints}^4)$	r_{exts} = le rayon extérieur du substrat (m) r_{ints} = 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 $G_g = 3,8$ GPa* $G_{alu} = 29 \pm 3$ GPa $G_{nylon} = 0,9 \pm 0,4$ GPa
$\tau_{rupture \text{ int. glace}}$ (MPa)	$\tau_{rupture \text{ int. glace}} = \frac{T_g r_{exts}}{J_g}$	

* 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.

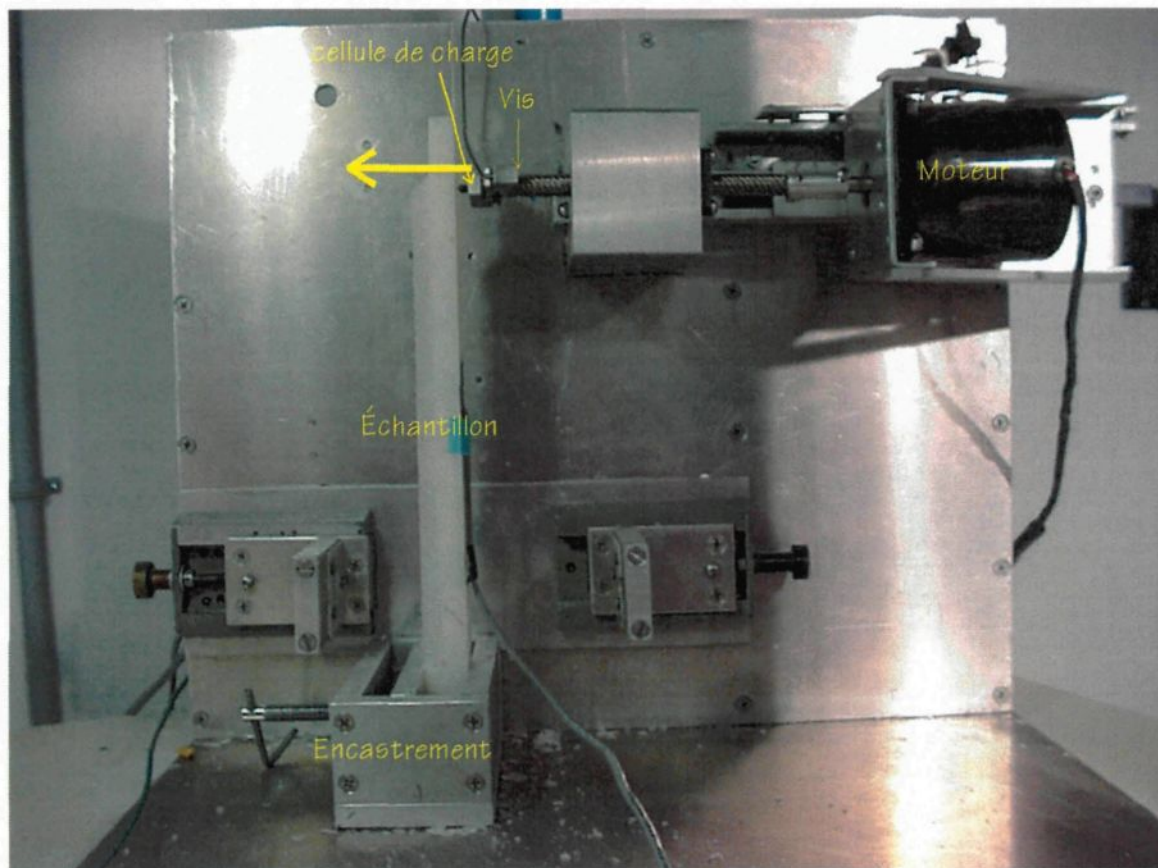


Figure 4-9 : Montage de l'essai de flexion givrée

Dans l'essai de flexion givrée, 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.

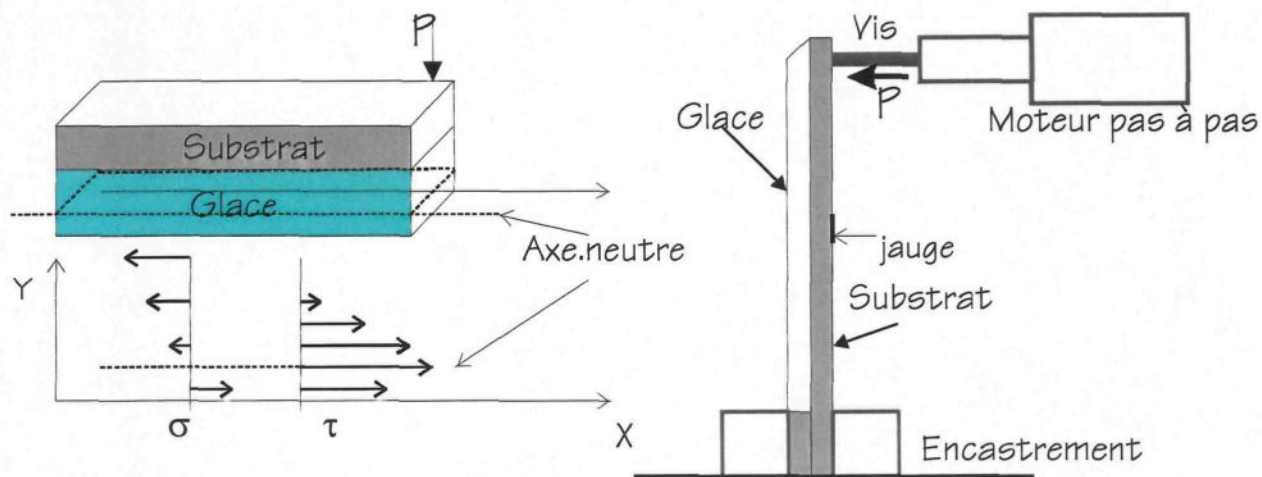


Figure 4-10 : Schéma de chargement : essai de flexion

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

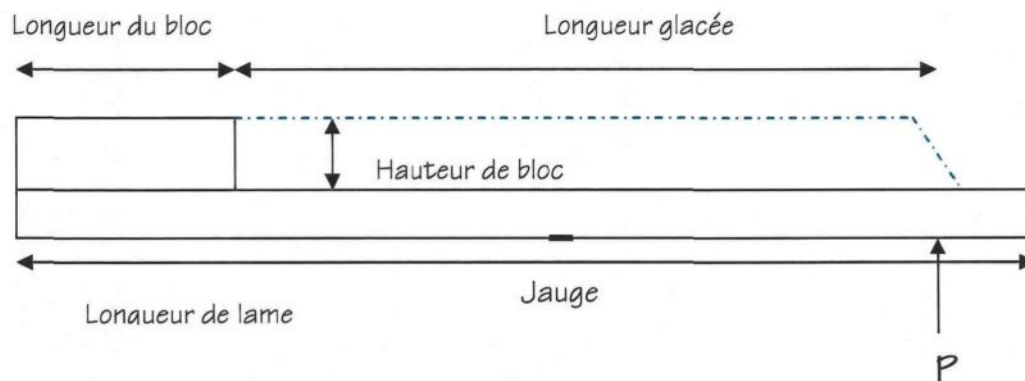


Figure 4-11 : Schéma des échantillons de flexion

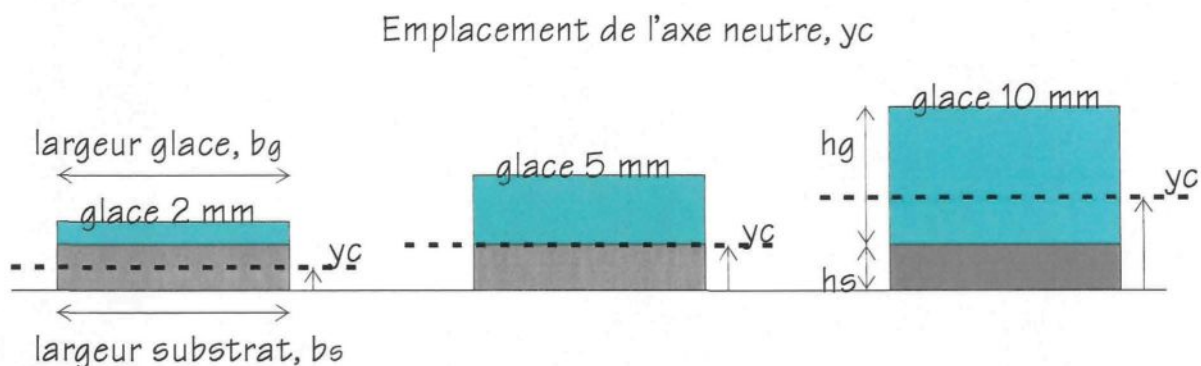


Figure 4-12 : Emplacement de l'axe neutre

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)
$\sigma_{rupture \text{ int. glace}}$ (MPa)	$\sigma_{rupt. \text{ int. glace}} = -\frac{M \cdot y_i}{I} \cdot n$	y_i = distance de l'interface par rapport à l'axe neutre (m)
$\tau_{rupture \text{ int. glace}}$ (MPa)	$\tau_{rupt. \text{ int. glace}} = \frac{V \cdot Q}{I \cdot b_g} \cdot n$	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 $Q = b_s h_s \left[(y_c - h_s) + \left(\frac{h_s}{2} \right) \right]$

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 reconverti en signal digital permettant le calcul statistique du Ra évalué en μm avec un seuil de $0,05 \mu\text{m}$ et un maximum mesurable de $10 \mu\text{m}$.

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 déglacement. 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-rco.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 déglacage, cinq (5) essais ont été réalisés durant lesquels est activé le muscle pneumatique préalablement givré et où est évalué qualitativement le déglacage 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**).

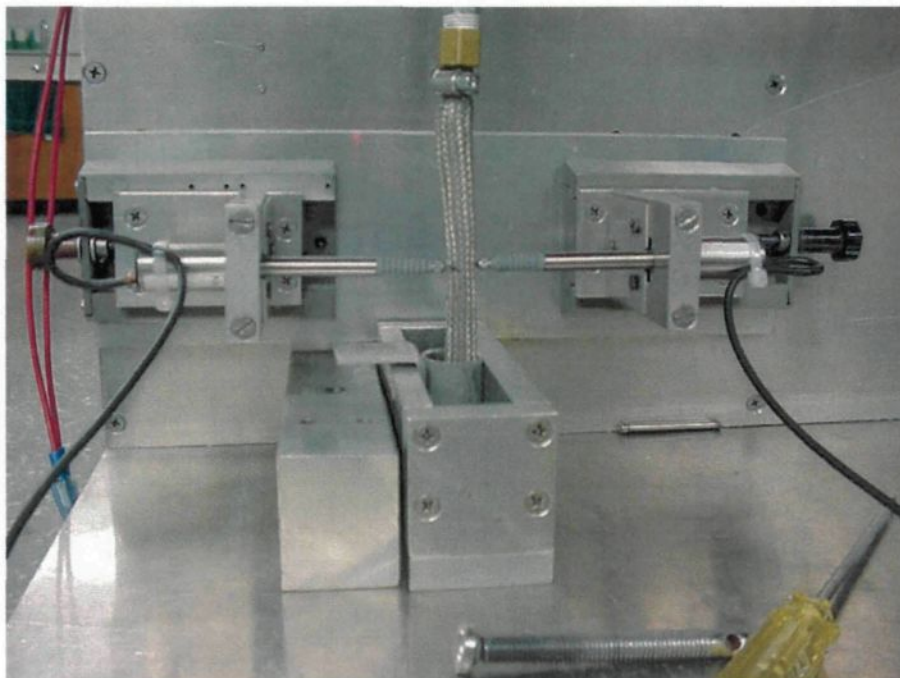


Figure 4-14 : Montage du système McKibben

4.7.2 Polymère électroactif (CPMI)

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

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/cm ² @1 volt d'entrée
Courant d'utilisation	50-100 mA/cm ² (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.

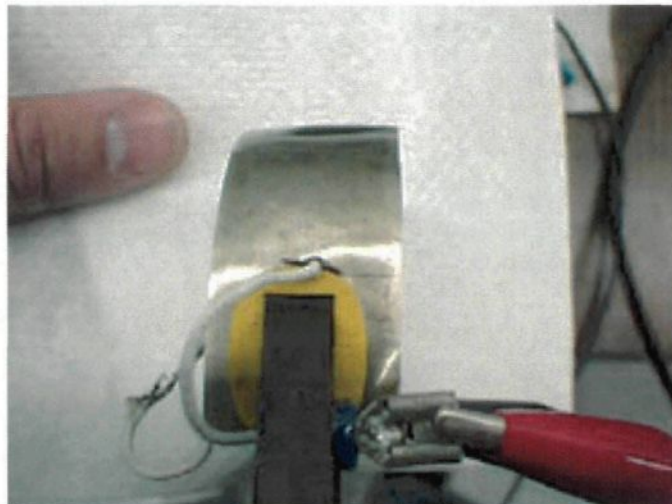


Figure 4-15 : Membrane IMPC

La surface de la membrane reçue est de 100 cm^2 . 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 déglacage. 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.

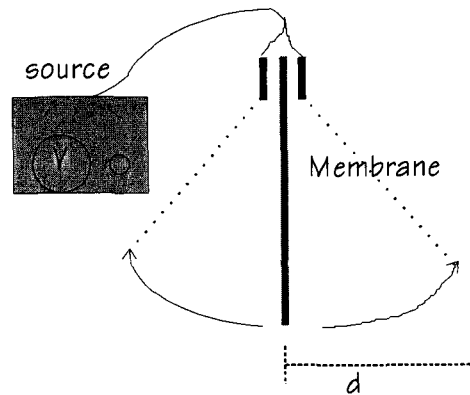


Figure 4-16 : Schéma partiel du montage vertical

4.7.3 Composite piézoélectrique (MFC)

Le potentiel d'utilisation d'une membrane flexible piézoélectrique comme activateur d'un système de déglçage 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 d.33)

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 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 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**.

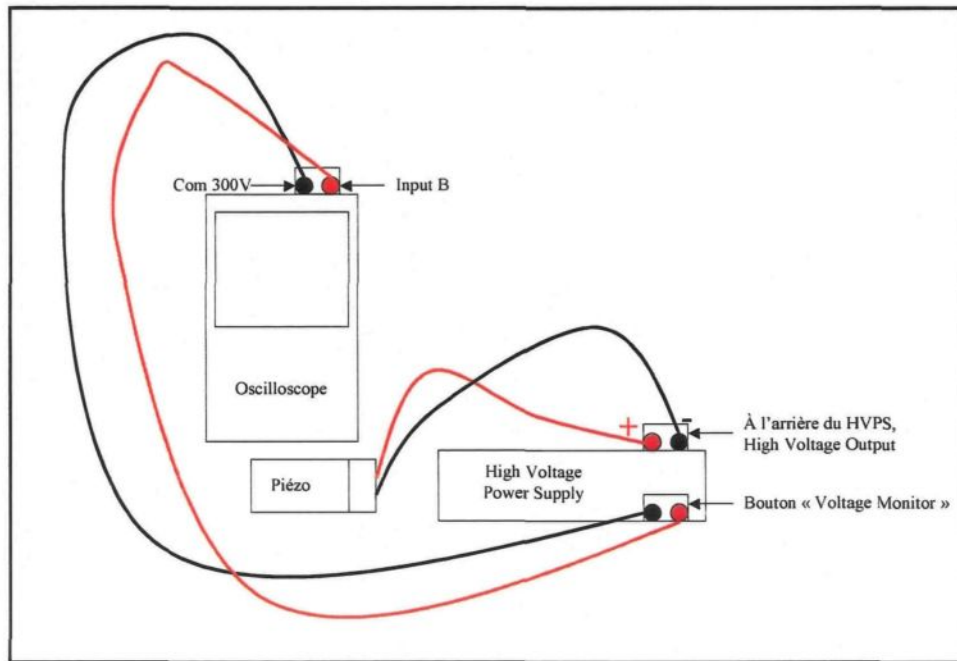


Figure 4-17: Schéma du montage de caractérisation MFC



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 jauges de déformation tandis que la force et le couple sont déterminés à l'aide de cellules de charge

appropriées. Toutes les jauges et cellules de charge ont été étalonnées après leur installation à température ambiante et à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Les régressions linéaires d'étalonnage ont toutes des coefficients de corrélation linéaire entre 0,9999 et 0,9998 démontrant le bon fonctionnement des capteurs (jauges 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 jauges 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 jauges.

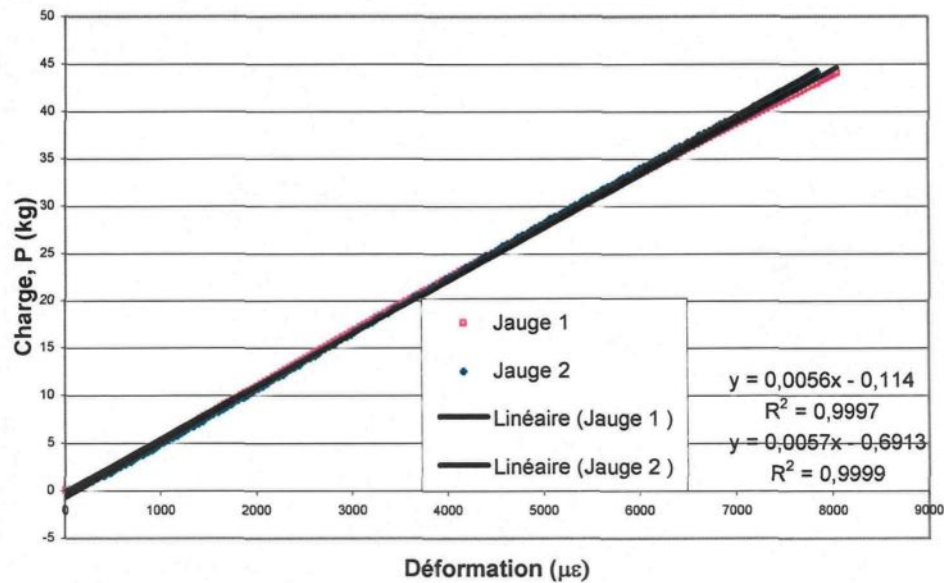


Figure 5-1 : Charge en fonction de la déformation en traction du Nylon

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.

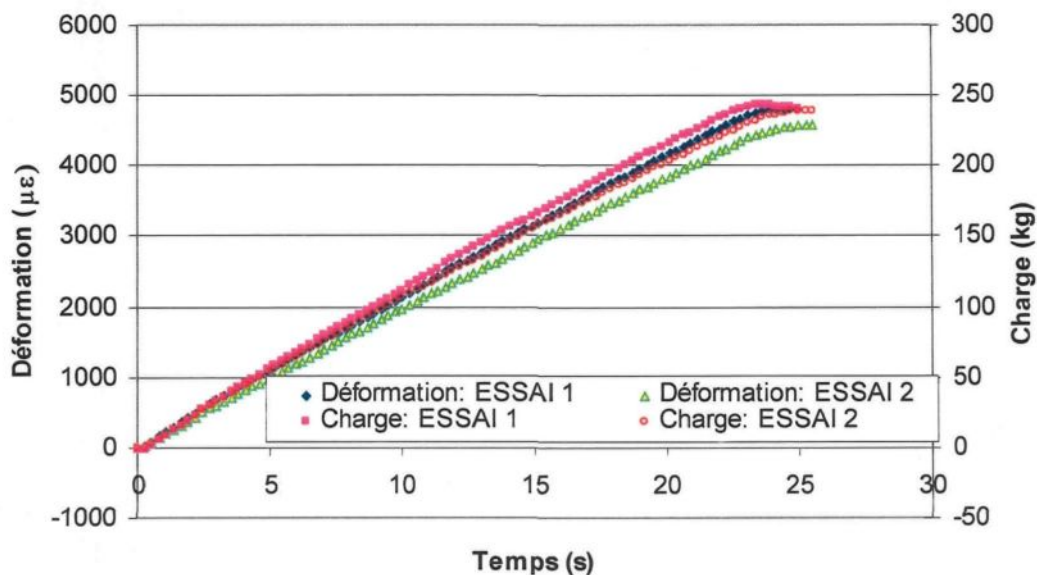


Figure 5-2 : Déformation et charge en fonction du temps lors d'un essai de traction répété avec une lame en Al 2024 T3 non givré (-10 °C)

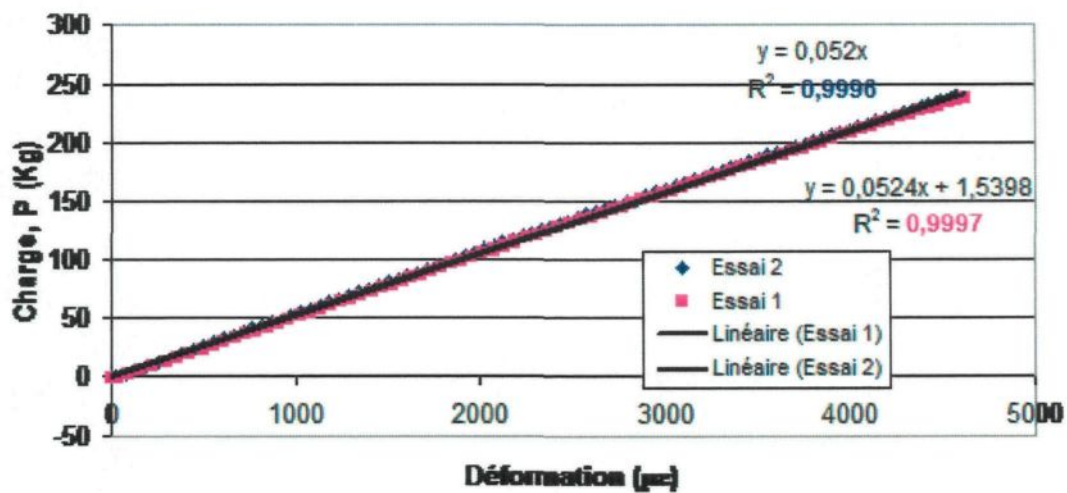


Figure 5-3 : Essai de traction répété avec une lame en Al 2024 T3 non givré (-10 °C)

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 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 $0,0004\text{ kg}/\mu\text{E}$ ou $0,8\%$. Donc, la répétabilité 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.

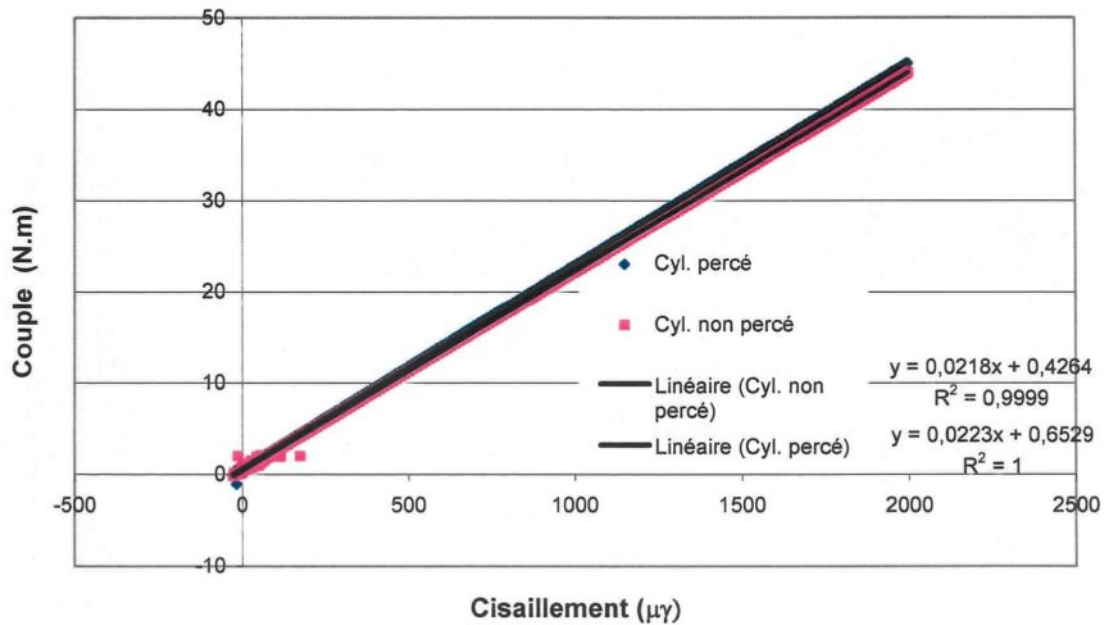


Figure 5-4 : Couple en fonction du cisaillement mesuré pour un tube percé et un tube non percé d'Al 2024 T3

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.

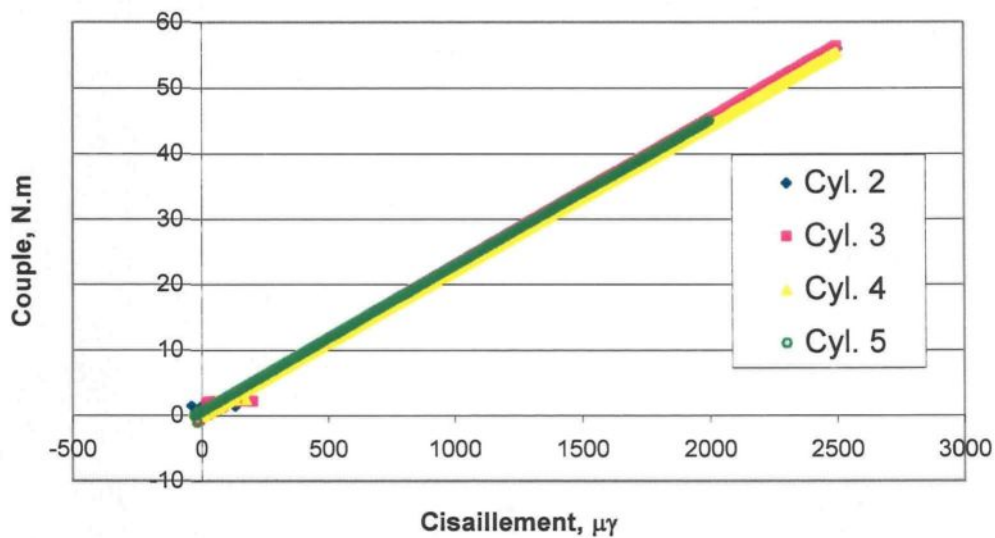


Figure 5-5 : Couple en fonction du cisaillement des tubes d'Al 2024 T3 sans glace

Tableau 5-1 : Pentés 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 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

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.

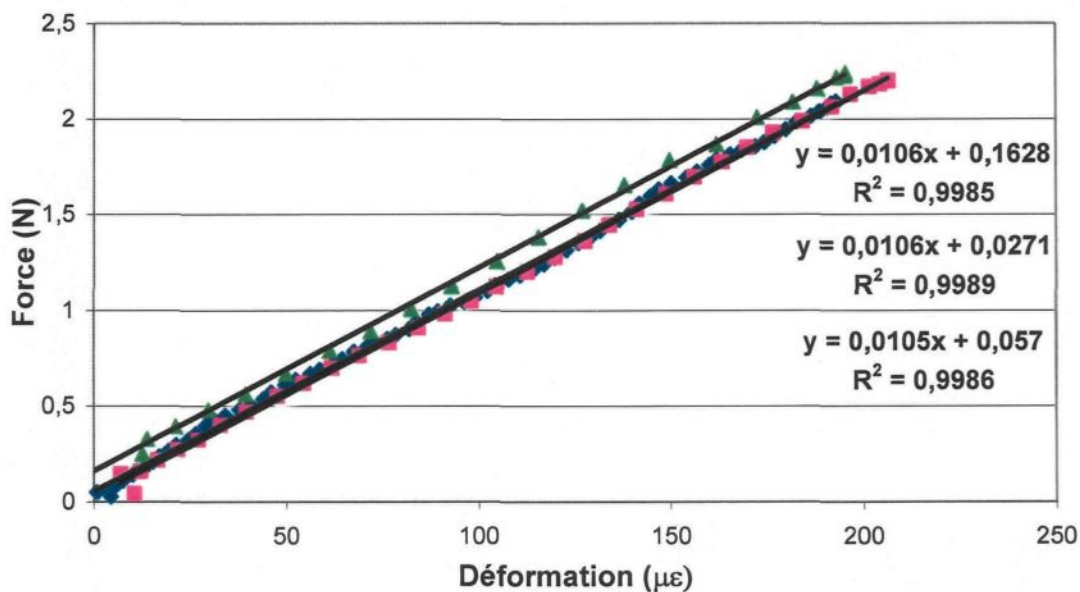


Figure 5-6 : Force en fonction de la déformation lors d'un essai de flexion répété avec une poutrelle d'Al 2024 T3 sans glace

Les trois courbes obtenues sont des droites de pente moyenne de $0,0105 \pm 0,0001\text{ N}/\mu\epsilon$ 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 (m^4)

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)

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

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

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

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

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

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

Les calculs montrent que pour une déflexion de 10 mm, la déformation pour une poutre d'aluminium 2024 T3 est de 200 $\mu\varepsilon$. Pour la même flèche, dans trois essais à différentes vitesses, la déformation mesurée par la jauge, est en moyenne de $198 \pm 5 \mu\varepsilon$ 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