

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

**MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN RESSOURCES ET SYSTÈMES**

**PAR  
CHRISTIAN TREMBLAY**

**DÉTERMINATION DE LA RÉSISTANCE À  
LA TRACTION DE LA GLACE ATMOSPHÉRIQUE**

**NOVEMBRE 1991**



### 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

Dans le cadre de ce mémoire de maîtrise, une méthode de détermination de la résistance à la traction de la glace atmosphérique a été développée. Dans cette méthode, la glace est formée à partir de gouttelettes d'eau surfondues qui viennent frapper un cylindre en aluminium et en laiton qui tourne à un tour par minute dans la section d'essai d'une soufflerie placée à l'intérieur d'une chambre froide. Les gouttelettes d'eau surfondues sont produites par un gicleur alimenté en air et en eau, dont les pressions d'alimentation sont ajustées par des servovannes contrôlées par un micro-ordinateur. Les programmes développés pour contrôler ces pressions d'alimentation permettent aux gouttelettes d'eau d'atteindre l'état d'équilibre cinétique et thermodynamique avec l'écoulement d'air.

Des essais de traction utilisant des jauges de déformation ont démontré que le montage développé précédemment lors des recherches du Groupe de Recherche en Ingénierie de l'Environnement Atmosphérique (G.R.I.E.A.) de l'Université du Québec à Chicoutimi (U.Q.A.C.), engendrait des problèmes qui peuvent influencer les résultats. Le nouveau montage développé a permis d'éliminer l'effet d'adhésion au centre des échantillons de glace. Il a aussi permis d'appliquer une charge plus uniformément répartie sur la section de glace, donc un taux de déformation plus uniforme.

C'est à une température de  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  et pour une vitesse du vent de  $23\text{ m/s}$ , avec un diamètre de gouttelettes  $d = 40\text{ }\mu\text{m}$  et une teneur en eau de  $1,2\text{ g/m}^3$ , qu'il y a eu le plus d'essais de traction réalisés. Ces conditions de formation, qui d'après les études précédentes réalisées à l'U.Q.A.C. correspondent à la résistance maximum de la glace atmosphérique, ont permis d'étudier l'influence du taux de déformation sur la résistance en traction de la glace atmosphérique. Une résistance maximum de  $5\text{ MPa}$  avait été mesurée avec l'ancien montage, comparativement à une résistance maximum de  $2,48\text{ MPa}$  avec le nouveau montage, pour un taux de déformation interpolé égal à  $2 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ . L'étude montre de plus que le nouveau montage donne des résultats plus constants.

Les modèles empiriques développés à partir des résultats ont montré que la résistance à la traction de la glace atmosphérique augmente avec le taux de déformation dans le domaine ductile, i.e. pour les taux de déformation inférieurs à environ  $2 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$  et qu'elle diminue pour les taux de déformation supérieurs correspondants au domaine fragile, ce qui est conforme à ce qui avait déjà été démontré dans les études antérieures et dans le cas de la glace de lac et de rivière.

## REMERCIEMENTS

Les travaux de recherche relatifs à la présentation de ce mémoire ont été exécutés au Département des Sciences Appliquées de l'Université du Québec à Chicoutimi.

Je témoigne ma vive gratitude à mon directeur de recherche, M. Jacques Druetz, Ph.D., ing. et Directeur du **GRIEA**. Son expérience au niveau des propriétés mécaniques de la glace atmosphérique et ses qualités de communicateur ont été grandement appréciées au cours de mes travaux.

Ma reconnaissance va aussi à M. Jean-Louis Laforte, Ph.D. pour ses judicieux conseils, critiques et discussions.

Je remercie M. Serge Gauthier pour le travail minutieux qu'il a accompli lors de la fabrication du montage expérimental et M. Bernard Desbiens pour le support technique.

Je dois aussi remercier le **C.R.S.N.G.** pour les subventions de recherche qui ont permis de débiter mes travaux de maîtrise.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>ii</b>
<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>iii</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTE DES SYMBOLES.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTE DES TABLES.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>ix</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>I. CARACTÉRISATION DES FACTEURS ET PARAMÈTRES D'ÉTUDE</b>	
1.1 Généralités.....	5
1.2 Comportement mécanique de la glace à la rupture.....	6
1.3 Caractérisation des paramètres mécaniques	
1.3.1 Module d'élasticité.....	7
1.3.2 Taux de déformation.....	9
1.3.3 Analyse des contraintes.....	10
<b>II. APPAREILLAGE ET PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE</b>	
2.1 Description.....	12
2.2 Formation des échantillons de glace atmosphérique.....	13

2.3	Description des montages utilisés pour l'accumulation de la glace	
2.3.1	Ancien montage de mesure.....	15
2.3.2	Mesure des déformations à l'aide de jauges de déformation.....	16
2.3.3	Nouveau montage de mesure.....	19
2.4	Procédure expérimentale	
2.4.1	Contrôle et formation de glace .....	21
2.4.2	Usinage et montage de mesure.....	28
2.4.3	Mesure de la résistance en traction.....	29
2.4.4	Mesure de la densité.....	31

### **III. CONDITIONS EXPÉRIMENTALES D'ESSAI**

3.1	Introduction .....	34
3.2	Classification générale.....	34
3.3	Formation en laboratoire.....	36

### **IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION**

4.1	Essais préliminaires	
4.1.1	Essais de traction avec jauges de déformation (ancien montage).....	39
4.1.2	Essais de traction (nouveau montage avec coupoles).....	41
4.2	Essais de traction (nouveau montage sans coupoles).....	43
4.3	Comportement général de la glace atmosphérique .....	43
4.4	Analyse des résultats et comparaison avec les essais antérieurs	
4.4.1	Effet du taux de déformation .....	44

4.4.2	Effet de la température de formation de la glace .	48
4.4.3	Effet de la vitesse du vent lors de la formation de glace .....	48

## **V. MODÉLISATION EMPIRIQUE ET VALIDATION DES RÉSULTATS**

5.1	Modélisation empirique des résultats.....	50
5.1.1	Modèles empiriques correspondant à l'ancien montage.....	51
5.1.2	Modèles empiriques correspondant au nouveau montage.....	51
5.1.2.1	Modèles sans les coupoles.....	52
5.1.2.2	Modèles combinés, montages avec et sans les coupoles.....	53
5.2	Validation des résultats d'essai .....	54
<b>CONCLUSIONS .....</b>		<b>56</b>
<b>RECOMMANDATIONS.....</b>		<b>58</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>		<b>61</b>

**ANNEXE 1: TABLES**

**ANNEXE 2: FIGURES**

**ANNEXE 3: PROGRAMME DE CONTRÔLE DES PRESSIONS  
D'ALIMENTATION EN AIR ET EN EAU DES  
GICLEURS**

**LISTE DES SYMBOLES**

- A = surface ( $\text{mm}^2$ ) ou ( $\text{m}^2$ )
- d = diamètre volumique moyen des gouttelettes ( $\mu\text{m}$ )
- E = module d'élasticité (MPa)
- F = force (N)
- G = module de rigidité en torsion (MPa)
- min = minute
- $^{\circ}\text{C}$  = degré Celsius
- V = volume ( $\text{cm}^3$ )
- w = teneur en eau de l'air ( $\text{g}/\text{m}^3$ )
- x = orientation selon l'axe des x
- y = orientation selon l'axe des y
- z = orientation selon l'axe des z
- $\sigma$  = contrainte normale (Pa)
- $\varepsilon$  = déformation unitaire (mm/mm)
- $\dot{\varepsilon}$  = taux de déformation ( $\text{s}^{-1}$ )
- $\rho$  = masse volumique ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
- $\nu$  = coefficient de Poisson
- T = température ( $^{\circ}\text{C}$ )
- v = vitesse du vent (m/s)

## LISTE DES TABLES

- Table 1: Gamme des vitesses de la presse mécanique ATS (Applied Test Systems).
- Table 2: Résistance à la traction (MPa) en fonction du taux de déformation, ancien montage ( $d = 40 \mu\text{m}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $T = -14 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 23 \text{ m/s}$ )
- Table 3: Résistance à la traction (MPa) en fonction du taux de déformation, ancien montage ( $d = 40 \mu\text{m}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $T = -8 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 23 \text{ m/s}$ )
- Table 4: Résistance à la traction (MPa) en fonction du taux de déformation, ancien montage ( $d = 40 \mu\text{m}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $T = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 23 \text{ m/s}$ )
- Table 5: Résistance à la traction (MPa) en fonction du taux de déformation, ancien montage ( $d = 40 \mu\text{m}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $T = -14 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 16 \text{ m/s}$ )
- Table 6: Résistance à la traction (MPa) en fonction du taux de déformation, nouveau montage avec coupoles ( $d = 40 \mu\text{m}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $T = -14 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 23 \text{ m/s}$ )
- Table 7: Résistance à la traction (MPa) en fonction du taux de déformation, nouveau montage sans coupoles ( $d = 40 \mu\text{m}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $T = -14 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 23 \text{ m/s}$ )
- Table 8: Résistance à la traction (MPa) en fonction du taux de déformation, nouveau montage sans coupoles ( $d = 40 \mu\text{m}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $T = -14 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 16 \text{ m/s}$ ); ( $d = 40 \mu\text{m}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $T = -8 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 23 \text{ m/s}$ ); ( $d = 40 \mu\text{m}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $T = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 23 \text{ m/s}$ )

## **LISTE DES FIGURES**

- Figure 1: Observation de verglas sur des câbles à La Pocatière.
- Figure 2: Observation de givre léger à la station de mesure expérimentale du Mont Valin sur un faisceau de câbles, un câble Bersimis, un câble de garde et différents types d'isolateurs.
- Figure 3: Allure théorique des courbes de résistance (flexion, torsion, traction, compression) en fonction du taux de déformation.
- Figure 4: Vue du gicleur alimenté en air et en eau pour reproduire les conditions atmosphériques.
- Figure 5: Vue des servo-mécanismes permettant l'ajustement des pressions d'alimentation du gicleur.
- Figure 6: Vue du micro-ordinateur permettant de contrôler l'ouverture des servo-vannes.
- Figure 7: Premier montage de traction réalisé par le G.R.I.E.A..
- Figure 8: Schéma représentant l'installation de jauges de déformation sur l'ancien montage.

**Figure 9:** Graphiques montrant la déformation en différents points sur un manchon de glace (ancien montage) en utilisant 3 paires de jauges de déformation (essais #1 et #2).

**Figure 10:** Graphiques montrant la déformation en différents points sur un manchon de glace (ancien montage) en utilisant 4 paires de jauges de déformation (essais #3 et #4).

**Figure 11:** Vue schématique des pièces composant le nouveau montage avec et sans coupoles.

**Figure 12:** Vue des pièces composant le nouveau montage.

**Figure 13:** Vue de l'assemblage des capuchons filetés sur les douilles de laiton.

**Figure 14:** Vue de l'assemblage des deux moitiés du cylindre de mesure; à droite, demi-montage sans la petite douille filetée pour mesurer la résistance et la déformation; à gauche, demi-montage avec la petite douille filetée pour l'accumulation de glace.

**Figure 15:** Vue de l'assemblage du cylindre pour l'accumulation de glace.

**Figure 16:** Section d'essai de la soufflerie avec le cylindre expérimental.

Figure 17: Schéma fonctionnel du système de commande des pressions d'alimentation en air et en eau.

Figure 18: Organigramme représentant le programme de contrôle des pressions d'alimentation en air et en eau du gicleur.

Figure 19: Cylindre expérimental avec accumulation de glace atmosphérique.

Figure 20: Usinage du manchon de glace atmosphérique.

Figure 21: Vue du cylindre expérimental, sans la tige d'assemblage.

Figure 22: Vue du cylindre sans une des petites douilles d'aluminium.

Figure 23: Vue du mécanisme de retrait des douilles centrales (tige filetée, écrou et clé).

Figure 24: Vue de dessus d'un manchon de glace atmosphérique sans les douilles centrales.

Figure 25: Vue de coté d'un manchon de glace atmosphérique sans les douilles centrales.

Figure 26: Presse mécanique ATS (Applied Test Systems).

Figure 27: Montage expérimental comprenant le manchon de glace, un capteur de déplacement à induction (LVDT) et un extensomètre.

Figure 28: Taillage de morceaux de glace atmosphérique pour la mesure de la densité.

Figure 29: Montage de mesure de la densité par le principe d'Archimède.

Figure 30: Vue des pièces du cylindre expérimental avec coupoles.

Figure 31: Ajout d'eau froide à l'interface coupole et glace.

Figure 32: Essai de traction sur le cylindre expérimental avec coupoles.

Figure 33: Résistance à la traction en fonction du taux de déformation (nouveau montage avec coupoles, essais préliminaires)

Figure 34: Résistance à la traction en fonction du taux de déformation (comparaison du nouveau montage avec coupoles et sans coupoles, essais préliminaires)

Figure 35: Vue schématique de l'application des charges pour le nouveau montage et l'ancien montage.

Figure 36: Résistance à la traction en fonction du taux de déformation (nouveau montage sans coupoles)

Figure 37: Comparaison des résultats du nouveau montage avec ceux de l'ancien montage pour les essais de traction ( $T = -14^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 23 \text{ m/s}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $d = 40 \text{ }\mu\text{m}$ ). Résistance à la traction en fonction du taux de déformation.

Figure 38: Comparaison entre les écart types du nouveau montage et ceux de l'ancien montage pour les essais de traction ( $T = -14^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 23 \text{ m/s}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $d = 40 \text{ }\mu\text{m}$ ). Résistance à la traction en fonction du taux de déformation.

Figure 39: Comparaison des résultats du nouveau montage avec ceux de l'ancien montage pour les essais de traction ( $T = -20^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 23 \text{ m/s}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $d = 40 \text{ }\mu\text{m}$ ). Résistance à la traction en fonction du taux de déformation.

Figure 40: Comparaison des résultats du nouveau montage avec ceux de l'ancien montage pour les essais de traction ( $T = -8^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 23 \text{ m/s}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $d = 40 \text{ }\mu\text{m}$ ). Résistance à la traction en fonction du taux de déformation.

Figure 41: Comparaison des résultats du nouveau montage avec ceux de l'ancien montage pour les essais de traction ( $T = -14^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 16 \text{ m/s}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $d = 40 \text{ }\mu\text{m}$ ). Résistance à la traction en fonction du taux de déformation.

Figure 42: Comparaison des résultats du nouveau montage avec ceux de l'ancien montage pour les essais de traction ( $v = 16 \text{ m/s}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $d = 40 \text{ }\mu\text{m}$ ;  $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ). Résistance à la traction en fonction de la température.

Figure 43: Comparaison des résultats du nouveau montage avec ceux de l'ancien montage pour les essais de traction ( $T = -14^{\circ}\text{C}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $d = 40 \text{ }\mu\text{m}$ ;  $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ). Résistance à la traction en fonction de la vitesse du vent.

Figure 44: Modélisation de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation (ancien montage)

Figure 45: Modélisation de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation (nouveau montage sans coupes)

Figure 46: Modélisation de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation (nouveau montage avec et sans coupes)

**Figure 47: Modélisation de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation (comparaison du nouveau montage sans coupoles et de l'ancien montage)**

**Figure 48: Modélisation de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation (comparaison du nouveau montage avec coupoles et sans coupoles combinés, avec l'ancien montage)**

## INTRODUCTION

Dans de nombreux pays, l'accumulation du givre et du verglas sur diverses structures est un problème très important pour beaucoup d'ingénieurs et de scientifiques. Des conférences spécialisées sont consacrées à l'étude du givrage des structures (Minsk, 1983; Ervik, 1987). En effet, les conséquences de la formation de glace atmosphérique sur les structures, les composantes mécaniques et le fonctionnement de divers mécanismes sont extrêmement importantes en termes d'accidents, de dommages matériels et de pertes de vies (Stallabrass, 1983; Hydro-Pressé, 1984; Brouillet, 1988).

Les problèmes qui nous préoccupent sont engendrés surtout par l'accumulation de la glace atmosphérique. Dans ce contexte, il est essentiel pour les ingénieurs de connaître avec assez d'exactitude les propriétés mécaniques de ce type de glace. La connaissance de la résistance limite est primordiale, car souvent ce sont les cas extrêmes qui nous intéressent pour les applications en ingénierie.

Depuis quelques années, les chercheurs s'entendent sur une définition générale de la glace. Kenneth (1951) la définit comme un matériau dont la viscosité est très élevée et possédant les caractéristiques d'un solide. Elle se

rompt comme un matériau fragile et cassant, ou peut se déformer indéfiniment selon le taux de déformation, la température et la structure de la glace.

Les propriétés mécaniques de la glace ordinaire de lac ou de rivière sont actuellement bien connues des scientifiques (Michel, 1978; Lafleur, 1970). Au contraire, peu d'études portant sur les propriétés mécaniques de la glace atmosphérique ont été réalisées, car il est difficile de produire, conserver et faire des mesures sur ce type de glace. De plus, les propriétés mécaniques de la glace atmosphérique varient considérablement suivant le type de glace formé, qui dépend pour sa part des conditions météorologiques observées durant la formation.

Près de 200 essais de traction ont déjà été réalisés avec un montage conçu dans le cadre du Groupe de Recherche en Ingénierie de l'Environnement Atmosphérique (G.R.I.E.A.) de l'Université du Québec à Chicoutimi (Druez et al., 1989). Cette méthode de mesure sera décrite et comparée à celle développée dans le cadre de ce mémoire de maîtrise.

Une étape préliminaire de ce travail fut de démontrer que la méthode de mesure réalisée par le G.R.I.E.A. donne des résultats qui ne représentent pas exactement le comportement réel de la résistance à la traction de la glace atmosphérique. Pour cela, des mesures utilisant des jauges de déformation collées sur des échantillons ont permis de visualiser les déformations tout le long d'un manchon de glace et les phénomènes suivants ont été observés :

- taux de déformation environ 10 fois plus élevé dans la partie centrale par rapport aux parties extrêmes du manchon de glace;
- adhésion de la glace sur la surface d'aluminium servant à former le manchon de glace atmosphérique;
- serrage de la glace sur les cylindres d'aluminium, occasionné par l'effet de Poisson au cours de l'essai de traction;
- variation des contraintes dans la section droite de la glace.

Suite à ces résultats, une nouvelle méthode de mesure a été développée. Elle vise essentiellement à éliminer les problèmes cités plus haut. Elle est analysée et comparée aux méthodes utilisées par d'autres auteurs (Druez et al., 1989, 1988, 1987).

L'étude présentée dans ce mémoire analyse l'effet des forces de traction appliquées à la glace atmosphérique et induites par des sollicitations mécaniques dynamiques. Plus spécifiquement, ce travail de recherche évalue l'influence du taux de déformation sur la résistance en traction de la glace atmosphérique.

Le but principal de notre étude était de développer une méthode permettant de déterminer la résistance à la traction de la glace atmosphérique, soit pour le givre, soit pour le verglas, en fonction du taux de déformation. La plupart des mesures ont été effectuées pour des conditions atmosphériques simulées

produisant du givre lourd, ce qui correspond au cas extrême de résistance à la traction. Quelques mesures ont été effectuées à d'autres températures et pour d'autres vitesses de vent pour des fins de comparaison.

La première étape de ce travail consiste en une présentation des différents concepts utilisés. Puis nous expliquerons les particularités de la méthode de mesure développée et utilisée dans cette recherche. Ensuite nous exposerons les conditions dans lesquelles les essais ont été effectués, les résultats obtenus, ainsi que l'analyse et la modélisation de ces résultats. Nous comparerons les résultats avec ceux réalisés par d'autres auteurs, et enfin nous terminerons avec la validation des modèles empiriques proposés à l'aide des résultats obtenus.

## **CHAPITRE I**

### **CARACTÉRISATION DES FACTEURS ET PARAMÈTRES D'ÉTUDE**

#### **1.1 Généralités**

Durant les saisons d'automne et d'hiver, il y a souvent formation de glace atmosphérique sur les structures ou les composantes mécaniques des systèmes de transmission électrique (figures 1 et 2), d'émission d'ondes, etc.... Lorsque surviennent de forts vents, ces éléments sont soumis à des forces (torsion, flexion, compression, traction) qui, éventuellement, peuvent compromettre leur stabilité.

Des observations dans la nature ont montré que ces forces peuvent provoquer des mouvements de la part de ces structures, de plusieurs mètres par rapport à leur position initiale, provoquant ainsi des sollicitations dynamiques dans les composantes mécaniques (Stallabrass, 1983; Hydro-Pressé, 1984; Brouillet, 1988).

## 1.2 Comportement mécanique de la glace à la rupture

Dans la littérature concernant la glace de rivière, (Michel, 1978; Lafleur, 1970) trois zones de comportement à la rupture sont identifiées en relation avec le taux de déformation. Un domaine de comportement ductile pour les faibles taux de déformation, un domaine fragile pour les taux élevés de déformation et une zone de transition entre le domaine parfaitement fragile et le domaine parfaitement ductile (figure 3). De plus, pour observer ces trois zones de rupture, une échelle logarithmique est utilisée pour la présentation d'une gamme élevée de taux de déformation.

Selon Lafleur (1970), dans le domaine fragile où les taux de déformation sont élevés, la glace, en général, se comporterait d'une façon parfaitement élastique (i.e. relation linéaire de proportionnalité contrainte-déformation). Cependant, lorsque le taux de déformation diminue, une zone de transition est observée et les fibres de la section de glace commencent à se plastifier. On dit que le processus de plastification s'amorce dès le début du chargement, sur toute la section de glace considérée, en fonction du taux de déformation. Or, des résultats expérimentaux ont prouvé (Lafleur, 1970) que dans cette zone de transition, l'échantillon doit se rompre avec une charge plus grande. En fait, on dit que la charge augmente dû à la plastification des fibres de la section.

Dans la zone dite de transition (figure 3), d'après Lafleur (1970), il se développe un processus de plastification des fibres. Ainsi, pour un taux de déformation légèrement inférieur au domaine fragile, l'échantillon doit se rompre avec les fibres quelque peu plastifiées. D'autre part, s'il y a diminution du taux de

déformation jusqu'à la limite supérieure du domaine parfaitement ductile, la glace se rompt avec la quasi-totalité des fibres plastifiées.

Aussi, lorsque le comportement mécanique de la glace est du type fragile, on parle de résistance à la rupture. Dans ce cas, on dit qu'il y a initiation d'une fissure qui se propage à travers toute la pièce. Au contraire, lorsque le comportement mécanique est du type ductile, on dit que c'est la limite de plasticité et qu'à ce stade de déformation, il n'y aurait pas rupture de l'échantillon de glace. Il y aurait plutôt déformation visqueuse (fluage). Cette déformation peut occasionner la rupture complète de la pièce, mais la limite correspondrait à la contrainte maximale que la glace peut supporter durant son comportement mécanique ductile.

### 1.3 Caractérisation des paramètres mécaniques

#### 1.3.1 Module d'élasticité

D'après la théorie élémentaire de l'élasticité linéaire (Shigley, J. E., Mitchell, L. D., 1983), dans le cas d'un chargement uniaxial, la déformation est reliée à la contrainte par:

$$\sigma_1 = E \cdot \varepsilon_1 \quad (1.3.1.1)$$

où:  $\sigma_1$  = contrainte de traction (MPa)  
 $E$  = module d'élasticité (MPa)  
 $\varepsilon_1$  = déformation relative (mm/mm)

De plus :

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\nu\varepsilon_1 \implies \nu = -\varepsilon_2 / \varepsilon_1 = -\varepsilon_3 / \varepsilon_1 \quad (1.3.1.2)$$

$$E = 2 G (1 + \nu) \quad (1.3.1.3)$$

où:  $\nu$  = coefficient de Poisson  
 $G$  = module de rigidité (MPa)

Ces équations peuvent nous permettre de calculer les constantes élastiques ( $E$ ,  $G$ ,  $\nu$ ) de la glace atmosphérique. L'utilisation de jauges de déformation, combinée avec l'utilisation d'un extensomètre (pour la validation) sur le montage expérimental décrit au paragraphe 2.3, permettrait d'obtenir une bonne qualité de résultats, dépendant de la minutie avec laquelle les montages et les mesures seraient effectués. Dans ce contexte, quelques essais préliminaires en traction ont été effectués sur le montage réalisé par le G.R.I.E.A. en utilisant des jauges de déformation. Les résultats présentés au paragraphe 4.1.1 démontrent que les déformations relatives varient fortement tout au long de l'échantillon de glace.

Il serait donc difficile de calculer ces constantes élastiques avec ce montage puisqu'on obtient un cas de chargement tridimensionnel et axi-symétrique. Les équations deviennent alors:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E}(\sigma_1 - \nu\sigma_2 - \nu\sigma_3) \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E}(-\nu\sigma_1 + \sigma_2 - \nu\sigma_3) \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E}(-\nu\sigma_1 - \nu\sigma_2 + \sigma_3) \end{aligned} \quad (1.3.1.4)$$

### 1.3.2 Taux de déformation

Dans le cadre de ce travail de recherche, nous allons particulièrement étudier l'influence du taux de déformation sur la résistance en traction de la glace atmosphérique.

Soit :

V	=	Vitesse de la traverse de la presse	(mm/s)
L	=	Longueur de l'échantillon de glace	(mm)
$\dot{\epsilon}$	=	Taux de déformation	(s <sup>-1</sup> )

Le taux de déformation en traction,  $\dot{\epsilon}$ , s'exprime:

$$\dot{\epsilon} = V/L \quad (\text{s}^{-1}) \quad (1.3.2.1)$$

Connaissant la vitesse de déplacement de la traverse de la presse mécanique et la longueur de l'échantillon de glace, on peut calculer le taux de déformation moyen ou théorique, qui servira de référence pour les essais de traction.

D'autre part, la déformation instantanée en un point de mesure peut être mesurée sur un manchon de glace atmosphérique en utilisant des jauges de déformation branchées sur un conditionneur de signal. Selon le manufacturier du conditionneur, lors d'un branchement en demi-pont (compensation en température), la déformation ( $\mu\text{m/m}$ ) est calculée selon l'équation suivante:

$$\epsilon = \frac{1}{V_E} \times \frac{4}{K} \times \frac{V_S}{A} \times 10^6 \quad (1.3.2.2)$$

où:

- $\varepsilon$  = déformation relative ( $\mu\text{m/m}$ )
- $V_E$  = Voltage d'excitation des jauges (V)
- $V_S$  = Voltage (signal) de sortie (V)
- A = Gain
- K = Facteur de jauge

Le taux de déformation en ce point peut aussi être calculé en mesurant deux déformations instantanées  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$  pour un intervalle de temps  $\Delta T$  (s). On obtient alors :

$$\dot{\varepsilon} = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) / \Delta T \quad (\text{s}^{-1}) \quad (1.3.2.3)$$

### 1.3.3 Analyse des contraintes

Lorsque la glace est soumise à une force de traction, il se développe des contraintes normales de traction dans la section de glace considérée. On traduit cet énoncé par l'équation:

$$\sigma = F/A \quad (1.3.3.1)$$

avec:

- $\sigma$  = contrainte normale de traction (MPa)
- F = force de traction (N)
- A = surface de la section considérée ( $\text{mm}^2$ )

Lorsque la charge augmente, les contraintes augmentent également jusqu'à ce qu'il y ait rupture de la glace. On dit que la rupture survient lorsque la contrainte de traction atteint la contrainte de propagation des fissures.

La contrainte qui produit cette rupture, ou la contrainte nécessaire pour propager le début d'une fissure, se nomme la résistance ultime ou maximum de la glace.

## CHAPITRE II

### APPAREILLAGE ET PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

#### 2.1 Description

L'équipement du GRIEA a permis de réaliser à l'UQAC tous les travaux expérimentaux effectués au cours de cette recherche sur la résistance en traction de la glace atmosphérique.

Le but principal de notre étude était de concevoir un montage permettant de déterminer la résistance à la traction de la glace atmosphérique, soit pour le givre, soit pour le verglas, en fonction du taux de déformation. La plupart des mesures ont été effectuées pour des conditions atmosphériques simulées produisant du givre lourd, ce qui correspond au cas extrême de résistance à la traction. Quelques mesures ont été effectuées à d'autres températures et pour d'autres vitesses de vent pour des fins de comparaison.

## **2.2 Formation des échantillons de glace atmosphérique**

La technique utilisée pour former des échantillons de glace atmosphérique a été développée depuis quelques années par le GRIEA (Druez et al., 1987, 1986a, 1986b). La méthode est la suivante :

- Les échantillons sont produits dans une soufflerie placée à l'intérieur d'une chambre froide dont les dimensions sont 6 x 4,3 x 3,3 m.
- La glace atmosphérique est formée à partir de gouttelettes d'eau surfondues, calibrées à un diamètre volumique moyen de 40  $\mu\text{m}$  dans le cas de cette étude.
- Le spectre des gouttelettes est mesuré soit à l'aide d'un granulomètre calibré, soit par des mesures de gouttelettes captées sur un film de collargol (Laforte et Nguyen, 1988 ).
- Pour la formation de glace sur l'ancien montage, les gouttelettes d'eau surfondues sont produites par un gicleur (figure 4) alimenté en air et en eau, dont les alimentations sont ajustées à des pressions fixes pour obtenir un diamètre volumique moyen et une teneur en eau de l'écoulement d'air à des valeurs calibrées (Druez et al., 1986).

- Pour la formation de glace sur le nouveau montage, les pressions d'alimentation sont ajustées par des servo-vannes (figure 5) contrôlées par un micro-ordinateur (figure 6) (Druez et Tremblay, 1987). Ainsi, il est possible d'améliorer le contrôle du diamètre volumique moyen à  $40 \mu\text{m}$  et la teneur en eau de l'écoulement d'air à la valeur choisie de  $1,2 \text{ g/m}^3$  pendant toute la durée de la formation de glace.
- Les gouttelettes d'eau surfondues viennent frapper un cylindre en aluminium et en laiton qui tourne à un tour par minute dans la section d'essai de la soufflerie, formant ainsi un manchon à peu près cylindrique.
- La section d'essai de la soufflerie est carrée et mesure 23 cm de côté, ce qui correspond à la longueur de glace accumulée sur le manchon.
- La distance séparant le gicleur et la section d'essai de la soufflerie est égale à 1,85 m, ce qui est suffisant pour permettre aux gouttelettes d'eau d'atteindre l'état d'équilibre cinétique et thermodynamique avec l'écoulement d'air (Druez et al., 1986).
- Le diamètre du cylindre sur lequel la glace atmosphérique est accumulée est égal à 32 mm, ce qui est voisin du diamètre des conducteurs électriques utilisés par Hydro-Québec pour les lignes à très haute tension (735 KV).

## **2.3 Description des montages utilisés pour l'accumulation de la glace**

Les différentes pièces des montages expérimentaux ont été usinées à l'UQAC.

### **2.3.1 Ancien montage de mesure**

Avant cette étude, de nombreux essais ont été effectués avec un montage conçu à l'automne 1985 (Druez et al., 1989, 1988, 1987).

Ce montage est composé d'un cylindre en aluminium formé de deux parties mises bout à bout suivant l'axe, centrées et rendues solidaires par une vis intérieure (figure 7-a). Une fois le manchon de glace formé, il est dressé sur un tour de façon à obtenir une section cylindrique uniforme de 10mm d'épaisseur. La vis de centrage et de fixation est alors enlevée (figure 7-b), ce qui permet de fixer l'échantillon sur la presse mécanique et de mesurer la résistance à la rupture en traction de la glace puisque les deux parties du cylindre ne sont plus solidaires. Les extrémités du cylindre en aluminium sont rugueuses de façon à empêcher le glissement du manchon de glace, tandis que sa partie centrale est polie pour réduire la friction.

### **2.3.2 Mesure des déformations à l'aide de jauges de déformation**

Des essais préliminaires effectués à l'aide des appareils suivants: presse mécanique ATS, micro-ordinateur utilisé pour l'acquisition de données, jauges de déformation, ont démontré que ce montage engendrait des problèmes qui influencent les résultats des mesures.

En utilisant le montage de mesure décrit dans la section 2.3.1, nous avons réalisé quatre essais de traction, avec des jauges de déformation fixées aux manchons de glace. La procédure est la suivante :

- Deux manchons de glace sont nécessaires pour réaliser les mesures. Un est utilisé pour l'essai de traction et l'autre pour la compensation en température.
- Deux essais ont été effectués avec trois paires de jauges, les deux autres avec quatre paires (figure 8).
- Des petits fils (modèle AWG-32, Alpha #1102 à 4 conducteurs) sont soudés sur les jauges de déformation (modèle 062WT).
- Ces dernières sont collées sur une surface de papier journal (bonnes propriétés d'absorption de l'eau) et les contacts sont protégés par un vernis isolant.

- A l'intérieur de la chambre froide ( $T = -8^{\circ}\text{C}$ ), chaque paire de jauges est trempée dans un bain d'eau pendant une minute pour que l'eau pénètre dans les pores du papier.
- Les jauges sont appliquées sur les manchons de glace et positionnées selon la figure 8. Le film d'eau gèle instantanément lorsque mis en contact avec la glace.
- Les paires de jauges sont branchées en demi-pont (compensation en température) sur des conditionneurs de signaux (un conditionneur par paire de jauges). Les fils sont branchés sur les connecteurs tel que décrit par le manufacturier des conditionneurs.
- Les jauges sont alimentées par un faible voltage d'excitation de 0.7 volt pour limiter la dissipation de la chaleur par effet Joule.
- Chaque conditionneur est ajusté à un gain de 9027 pour obtenir un voltage de sortie maximum de 5 volts, ce qui correspond à une déformation relative maximum de  $1500 \mu\text{m/m}$ .
- Une carte d'acquisition de données installée sur un IBM PC et l'utilisation d'un programme FORTRAN permettent d'échantillonner, à intervalles de temps réguliers, la prise de données et de transformer les voltages analogiques en valeurs numériques.

- Les signaux sont transformés en déformations puisque la valeur numérique "2048" correspond à 5 volts en valeur analogique, qui correspond pour sa part à 1500  $\mu\text{m/m}$ , en utilisant l'équation (1.3.2.2).
- Les mesures de la déformation ( $\epsilon$ ) et du temps ( $t$ ) pour les différents points de mesure sont mises dans un fichier et traitées à l'aide d'un programme LOTUS-SYMPHONY.
- La vitesse utilisée pour la traverse de la presse est 0,12 mm/min.
- Les conditions de formation de la glace sont:
  - Température =  $-8^{\circ}\text{C}$
  - Vitesse de l'air = 23 m/s
  - Teneur en eau =  $1,2 \text{ g/m}^3$
  - Diamètre volumique moyen des gouttelettes =  $40 \mu\text{m}$

Les résultats, présentés au paragraphe 4.1.1, se réfèrent aux figures 9 et 10 et nous ont permis de constater les problèmes suivants :

- L'adhésion de la glace sur la partie polie du cylindre d'aluminium implique un taux de déformation qui varie et une augmentation de la force de traction.
- L'effet de Poisson augmente la friction entre la glace et l'aluminium dû à un serrage à l'interface glace et aluminium.

- La transmission des efforts de traction se faisant par l'intérieur du manchon de glace, ceci implique une répartition non-uniforme des charges sur la section de glace considérée, donc une variation des contraintes dans la section droite des échantillons de glace.
- Les plans de rupture observés sont souvent irréguliers.

### **2.3.3 Nouveau montage de mesure**

Pour éliminer ces problèmes, un montage a été conçu dans le cadre de ce mémoire de maîtrise. Le cylindre utilisé pour l'accumulation de glace atmosphérique était auparavant fabriqué en aluminium. Le laiton est utilisé ici afin de réduire le frottement des matériaux et les coincements dus à la dilatation thermique. La figure 11 présente trois coupes schématiques du nouveau montage avec la numérotation de chaque pièce permettant une meilleure compréhension du texte.

Le montage est formé de six douilles (1, 2, 3), de deux capuchons (4) et d'une tige d'assemblage centrale (5 et 6) (figure 12). Les douilles de laiton (1) sont filetées extérieurement de manière à offrir le maximum d'adhérence à la glace sur la surface considérée.

Les deux capuchons (4), filetés à l'intérieur, permettent de fixer les douilles de laiton (1) aux extrémités du cylindre (figure 13). Les douilles d'aluminium (2 et 3) sont insérées à l'intérieur des cylindres de laiton (figure 14) et elles sont évidées au centre afin de rendre le tout solidaire par l'entremise de la tige

d'assemblage (5 et 6) (figure 15). On peut remarquer que les douilles d'aluminium (2 et 3) sont filetées partiellement à l'intérieur pour permettre de les retirer après formation de la glace, pour fins de mesures.

Avantages du montage :

- Aucune adhésion et aucun effort de serrage au centre de l'échantillon étant donné que l'on peut retirer les douilles centrales.
- La charge devrait être plus uniformément répartie sur la section de glace puisque la charge est appliquée sur l'axe des filets des douilles de laiton.
- Le taux de déformation devrait être plus constant sur toute la longueur considérée car le frottement sur une douille centrale est éliminé.
- Possibilité de mesurer le coefficient de Poisson

En effet, en utilisant des jauges de déformation lors d'un essai de traction, il est possible de mesurer les déformations selon l'axe de traction ( $\epsilon_1$ ) et la déformation selon l'axe tangentiel perpendiculaire à l'axe de traction ( $\epsilon_2$ ).

Sachant que :

$$\epsilon_2 = -\nu\epsilon_1 \implies \nu = -\epsilon_2 / \epsilon_1 \quad (\text{équation 1.3.1.2})$$

(Cette étude pourrait faire l'objet d'un sujet de maîtrise)

Des mesures ont déjà été effectuées à l'aide de jauges de déformation sur la glace de mer et les résultats peuvent servir de référence (Sinha, N. K., 1989).

Désavantages du montage :

- Nécessite beaucoup plus de manipulations que celui utilisé lors des recherches antérieures.
- Augmente les risques de fissures accidentelles dans la glace.

## **2.4 Procédure expérimentale**

Avant chaque essai, le cylindre en aluminium et en laiton est soigneusement nettoyé avec de l'eau tiède et du savon. Il est ensuite nettoyé avec de l'alcool, lubrifié légèrement aux endroits filetés des capuchons pour faciliter leur dévissage, puis il est séché et placé dans la section d'essai de la soufflerie pendant deux heures afin de stabiliser sa température (figure 16).

### **2.4.1 Contrôle et formation de glace**

Nous avons mentionné au paragraphe 2.2 que la glace atmosphérique était formée à partir de gouttelettes d'eau surfondues produites par un gicleur (figure 4) alimenté en air et en eau, dont les pressions d'alimentation sont ajustées par des servo-vannes (figure 5) contrôlées par un micro-ordinateur (figure 6). Ce système permet d'ajuster le diamètre volumique moyen des gouttelettes et la

teneur en eau de l'écoulement d'air à des valeurs calibrées pendant toute la durée de la formation de glace.

Une étude a été faite concernant ce système afin de bien contrôler les pressions d'alimentation en air et en eau. Elle consiste en premier lieu à bien comprendre l'instrumentation utilisée et ensuite à établir des modèles mathématiques permettant de contrôler chaque pression d'alimentation.

Le schéma fonctionnel (figure 17) montre l'instrumentation à utiliser pour contrôler une pression d'alimentation quelconque et il se décrit comme suit :

- Les instruments utilisés sont principalement un ordinateur muni d'une carte d'acquisition de données et deux convertisseurs dont l'un transforme le voltage en courant et l'autre le courant en pression d'air. Cette pression d'air permet de positionner le plongeur d'une servovanne, donc contrôle l'ouverture d'alimentation d'un système de pression. Un capteur de pression est installé sur le système à contrôler (pression d'air ou pression d'eau). Il est excité par un conditionneur de signal qui fournit à l'ordinateur un voltage analogique correspondant à la pression de sortie.
- Pour décrire plus précisément le système, la carte d'acquisition de données est installée sur un ordinateur IBM PC et l'utilisation d'un programme FORTRAN (voir en annexe 3) permet d'échantillonner un signal analogique venant d'un instrument (dans notre cas, c'est un capteur de pression).

- Le programme compare le signal (venant du capteur) à la valeur initiale et applique un signal analogique vers un autre instrument permettant de corriger le signal à contrôler.
  
- Le programme transforme d'abord les voltages analogiques (0 à 10 V) en valeurs numériques (0 à 4096). Il calcule, selon un modèle mathématique qui sera décrit plus loin, les valeurs numériques à appliquer afin de corriger le signal (pression de sortie) à contrôler.
  
- Ces valeurs numériques à appliquer (0 à 4096) sont transformées en voltages analogiques (0 à 10 V).
  
- Le voltage analogique excite un instrument (CONVERTISSEUR) qui permet de le transformer en courant. Ainsi, 0 volt à l'entrée correspond à 4 milliampères à la sortie et 10 volts à l'entrée correspondent à 20 milliampères à la sortie.
  
- L'ampérage, pour sa part, excite un autre CONVERTISSEUR qui permet de transformer le courant en pression d'air. Ainsi, 4 milliampères à l'entrée fourniront 0,02 MPa (3 Psi) de pression d'air à la servo-vanne qui sera en position fermée (le débit du système à contrôler devient nul) et 20 milliampères à l'entrée fourniront 0,1 MPa (15 Psi) à la servo-vanne qui sera en position complètement ouverte (le débit du système à contrôler est alors maximum).

- Les pressions d'entrées (en air et en eau) des servo-vannes sont régularisées à 0,52 MPa (75 Psi ) ce qui nous permet de contrôler une gamme de pression variant de 0 à environ 0,48 MPa (0-70 Psi). D'autre part, même s'il y a des perturbations de pression à l'entrée des servo-vannes, le modèle mathématique qui sera présenté plus loin permet de les compenser rapidement.
- Un capteur de pression est installé à la sortie de chaque servo-vanne et chacun d'eux est branché à un conditionneur de signal qui fournit 1.0 volt d'excitation. Les capteurs de pression sont calibrés pour mesurer des pressions variant de 0 à 0,35 MPa (0-50 Psi) correspondant à un signal de sortie variant de 0 à 100 millivolts.
- Les voltages de sortie (0 à 100 mV) sont retournés aux conditionneurs de signal qui appliquent un gain ( $K = 100$ ) pour fournir des voltages analogiques variant de 0 à 10 V.
- Les voltages analogiques (0 à 10 V) sont transformés en valeurs numériques (0 à 4096) et sont comparés aux anciennes valeurs mémorisées. Les modèles mathématiques permettent de calculer les nouvelles valeurs numériques à transmettre aux servo-vannes. Ainsi la boucle de commande est continue.

Deux équations mathématiques sont nécessaires pour contrôler chaque pression d'alimentation (en air ou en eau). Ces équations ont été déterminées par lissages de courbes à partir de données (pressions) prises par acquisition de

données. En effet, nous avons mesuré les réponses aux différents échelons soit les réponses à des échelons de 500, 1000, 1500, 2500 et 3000 en valeur numérique. Cela nous a permis de constater que les deux systèmes sont sous-amortis dans le sens que pour atteindre le régime permanent (une pression de sortie constante) un délai variant entre 10 et 60 secondes était nécessaire. De plus, nous avons remarqué que le délai pour la pression d'eau était environ deux fois celui de l'air. Cela est dû au débit et à la compressibilité de l'air comprimé qui sont plus élevés que pour l'eau.

Les réponses aux différents échelons nous ont permis de déterminer par lissage de courbes les deux premiers modèles utilisés pour le contrôle des pressions en régime permanent, soit:

pour la pression d'air :  $FSTEPAIR(x) = 1.78x^2 + 71.6x + 17.0$

pour la pression d'eau :  $FSTEPEAU(x) = 0.75x^2 + 8.07x + 0.54$

où :  $FSTEPAIR(x)$  = la valeur numérique à appliquer en régime permanent pour l'air

$FSTEPEAU(x)$  = la valeur numérique à appliquer en régime permanent pour l'eau

$x$  = erreur entre la pression mesurée et celle désirée

Deux autres modèles ont été déterminés afin de prévoir une réponse dynamique à un faible échelon, parce qu'il a été démontré que plus l'échelon

était faible, plus le délai était grand avant d'atteindre le régime permanent. Par exemple, pour une erreur de 0,007 MPa (1 Psi) de pression d'eau, cela impliquait un temps d'attente d'environ une minute.

Donc les deux autres modèles servant de gain ont été déterminés et permettent d'avoir une réponse dynamique aux erreurs de pression. La manière pour déterminer ces modèles a consisté à prendre comme données les pressions mesurées après trois secondes, pour des échelons en régime permanent beaucoup plus élevés. Par exemple, nous avons pris comme donnée après trois secondes 0,027 MPa (4 Psi) pour un échelon en régime permanent de 0,14 MPa (20 Psi). On a fait de même pour les autres échelons et les résultats ont permis d'établir par lissages de courbes les deux autres équations. Celles-ci sont valables pour trois secondes après le calcul d'erreur entre la valeur mesurée et la valeur recherchée, soit:

pour la pression d'air :  $FAIR(x) = 6.17x + 65.8$

pour la pression d'eau :  $FEAU(x) = 3.93x + 21.5$

où :  $FAIR(x)$  = la valeur numérique à appliquer pendant trois secondes pour l'air.

$FEAU(x)$  = la valeur numérique à appliquer pendant trois secondes pour l'eau.

$x$  = erreur entre la pression mesurée et celle désirée.

Après avoir déterminé les équations mathématiques nécessaires au contrôle des pressions d'alimentation en air et en eau, un organigramme du programme de contrôle (figure 18) a été rédigé et se décrit comme suit:

- Définition des fonctions (équations mathématiques) utilisées, ainsi que des paramètres (numéro de carte utilisé, numéros des canaux d'entrées et de sorties, temps de délai, etc....).
- Initialisation des variables: pression d'air initiale = 0 MPa (0 Psi), pression d'eau initiale = 0 MPa (0 Psi), temps de délai = 3000 millisecondes, etc...).
- Lecture des valeurs désirées (pression d'air et pression d'eau voulues, temps de formation d'un échantillon de glace).
- Exécution de la boucle de contrôle (trois secondes de délai par boucle)
  - calcul des erreurs entre les valeurs désirées et les valeurs mesurées ou initiales;
  - calcul des fonctions mathématiques:  $F_{STEPAIR}(x)$ ,  $F_{AIR}(x)$   
 $F_{STEPEAU}(x)$ ,  $F_{EAU}(x)$
  - application des sous-programmes d'entrée et sortie analogiques créés par le concepteur des cartes d'acquisition de données (sorties analogiques simples de départ pour un contrôle dynamique, temps d'attente de trois secondes, sorties analogiques simples d'arrivée pour le régime permanent et entrées analogiques simples des capteurs de pression).

- Lorsque le temps de formation de la glace atmosphérique est écoulé, il y a fermeture des servo-vannes et un signal sonore se fait entendre indiquant la fin de la formation de glace atmosphérique.
- L'annexe 3 présente une copie du programme FORTRAN de contrôle.

La glace atmosphérique est accumulée jusqu'à ce qu'une épaisseur à peu près uniforme de  $25\text{mm} \pm 5\text{ mm}$  soit formée sur le cylindre, ce qui nécessite une durée moyenne d'une heure de formation pour une teneur en eau de  $1,2\text{ g/m}^3$  (figure 19).

#### 2.4.2 Usinage et montage de mesure

Une fois le manchon de glace atmosphérique formé, il est dressé sur un tour de façon à obtenir deux diamètres cylindriques uniformes (figure 20) soit :

- $\varnothing_1 = 48\text{ mm}$  au centre du manchon sur une longueur de déformation de  $40\text{ mm}$ .
- $\varnothing_2 = 70\text{ mm}$  aux extrémités du manchon.

La section centrale est usinée de manière à obtenir une épaisseur uniforme de  $8\text{ mm}$  de glace sur la surface d'aluminium. Les sections situées aux extrémités du manchon ont une épaisseur de glace plus élevée afin de localiser la rupture dans la partie centrale du manchon. Un rayon de  $5\text{ mm}$  est prévu entre les

passages du petit diamètre aux grands diamètres de manière à réduire les concentrations des contraintes.

La vis d'assemblage (5, 6) est alors enlevée (figure 21) et les douilles (1, 2, 3) deviennent donc solidaires par l'entremise de la glace atmosphérique accumulée.

Pour éviter le centre du manchon de glace, il s'agit de :

- dévisser les capuchons (4) situés aux extrémités du manchon;
- retirer les petites douilles (2) de chaque côté (figure 22);
- replacer les capuchons (4) et retirer les douilles centrales (3) à l'aide d'une tige filetée (7) et d'un écrou (8) servant d'épaulement (figure 23).

Les douilles centrales (3) deviennent des écrous et permettent l'assemblage de tiges semi-filetées (9) aux extrémités du manchon; le montage est alors prêt pour l'essai de traction.

Le fait de retirer la douille d'aluminium située à l'intérieur du manchon (figures 24 et 25) permet d'éviter l'effet d'adhésion de la glace sur l'aluminium. Ainsi, on obtient une charge plus uniformément répartie dans l'échantillon de glace considéré.

#### **2.4.3 Mesure de la résistance en traction**

Une presse mécanique construite par la compagnie ATS (Applied Test Systems, figure 26) et spécialement conçue pour opérer à des températures

inférieures à 0°C, permet de mesurer la résistance à la traction de la glace atmosphérique. Elle est munie d'un sélecteur de vitesses permettant des vitesses de déplacement de la traverse variant de  $5 \times 10^{-5}$  à  $5 \times 10^2$  mm/min. La gamme de vitesses possible est représentée à la table 1.

Le montage de traction déjà décrit est installé sur la presse mécanique. Un capteur de déplacement linéaire à induction (LVDT) et un extensomètre sont installés sur le montage (figure 27) afin de mesurer les déformations lors de l'essai de traction.

La console de la presse mécanique est munie d'un traceur X-Y permettant de tracer la courbe "force de traction" en fonction :

- du déplacement de la traverse, pour les vitesses élevées (1 mm/min et plus);
- du déplacement mesuré par l'extensomètre, pour les vitesses plus faibles (inférieures à 1 mm/min).

La raison pour cela est qu'à des vitesses de la traverse supérieures à 1 mm/min, on se situe dans le domaine de rupture fragile de la glace et que l'impact à la rupture risquerait d'endommager l'extensomètre.

Deux autres traceurs sont utilisés afin d'enregistrer tous les signaux de mesure en fonction du temps, soit :

- la force de traction en fonction du temps;
- la vitesse de la traverse en fonction du temps;
- le déplacement mesuré par le LVDT en fonction du temps;
- le déplacement mesuré par l'extensomètre en fonction du temps.

Toutes ces informations sont nécessaires afin d'analyser, de modéliser, de comparer et de valider les résultats pour atteindre les objectifs de ce travail.

#### **2.4.4 Mesure de la densité**

Quelques mesures de densité ont été réalisées afin de vérifier si les conditions expérimentales de formation étaient les mêmes que celles réalisées au cours des études antérieures. La densité de la glace atmosphérique a été mesurée en utilisant le principe d'Archimède. Pour cela, les échantillons de glace sont plongés dans un contenant rempli d'huile, après avoir été recouverts d'une pellicule de formvar qui empêche l'huile de pénétrer dans les pores de la glace.

Étapes de mesure de la densité :

- Des morceaux de glace, conservés dans un congélateur dans un sac de plastique après l'essai de traction, sont découpés à l'aide d'une scie à ruban (figure 28). On utilise des morceaux de glace ayant une masse variant de 8 à 14g. et la température de la chambre froide est fixée à  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- Trois morceaux de glace sont découpés pour chaque essai de mesure de densité afin d'obtenir une bonne précision et aussi de déceler des erreurs de manipulation qui pourraient survenir lors des mesures.
- Les échantillons sont sablés afin d'obtenir des surfaces lisses et uniformes.
- Deux entailles sont faites dans la glace pour attacher un fil de cuivre très fin dont la masse est de l'ordre de grandeur de la précision de la balance, donc négligeable.
- La masse ( $M_1$ ) de chaque morceau de glace est mesurée à l'aide d'une balance mécanique (précision =  $\pm 0,005$  g).
- Les morceaux de glace sont trempés dans le formvar liquide qui devient un film plastique très léger après un séchage d'au moins quinze (15) minutes. Cette étape permet d'annuler l'effet de porosité de la glace et ainsi de conserver son volume.
- La masse de la glace recouverte de formvar ( $M_2$ ) est mesurée afin de soustraire son effet sur la densité recherchée.
- La masse d'un bécher contenant une certaine quantité d'huile ( $M_3$ ) est mesurée.

- La glace enrobée de formvar est plongée dans le bécher rempli d'huile (figure 29); la masse ( $M_4$ ) est mesurée et connaissant la densité de l'huile et du formvar, on peut calculer la densité de la glace atmosphérique, à partir de la poussée d'Archimède, par les équations suivantes :

$$V_{\text{formvar}} = (M_2 - M_1) / \rho_{\text{formvar à } -10^\circ\text{C}} \quad \text{cm}^3 \quad (2.4.4.1)$$

$$V_{\text{glace+form.}} = (M_4 - M_3) / \rho_{\text{huile à } -10^\circ\text{C}} \quad \text{cm}^3 \quad (2.4.4.2)$$

$$\rho_{\text{glace}} = M_1 / (V_{\text{glace+form.}} - V_{\text{formvar}}) \quad \text{g/cm}^3 \quad (2.4.4.3)$$

Où :

$$\rho_{\text{huile à } -10^\circ\text{C}} = 0,841 \quad \text{g/cm}^3$$

$$\rho_{\text{formvar à } -10^\circ\text{C}} = 1,254 \quad \text{g/cm}^3$$

$$V_{\text{formvar}} = \text{Volume du formvar}$$

$$V_{\text{glace+form.}} = \text{Volume de la glace et du formvar}$$

## **CHAPITRE III**

### **CONDITIONS EXPÉRIMENTALES D'ESSAI**

#### **3.1 Introduction**

Nous savons tout d'abord que les conditions expérimentales de formation de la glace atmosphérique sont simulées en laboratoire. Ces conditions de formation sont réalisées à partir de l'expérience acquise et des observations faites en nature par le G.R.I.E.A..

La glace atmosphérique est généralement formée sur les objets ou les autres éléments de structure exposés au niveau du sol, à des températures en bas du point de congélation. Des accumulations se forment par accréation de gouttelettes surfondues, c'est à dire liquides à une température inférieure au point de congélation, qui gèlent au contact d'une surface (Laforte, 1988).

#### **3.2 Classification générale**

Théoriquement, on distingue trois grands types de glace d'origine atmosphérique: le verglas, le givre lourd et le givre léger. Cette classification se

base essentiellement sur la transparence et la densité de la glace obtenue (Laforte, 1988).

- Le verglas est une glace transparente ou claire. Il présente une masse volumique supérieure à  $0,8 \text{ g/cm}^3$ , par référence à la masse volumique théorique de la glace qui est de  $0,917 \text{ g/cm}^3$ . Le verglas se forme en régime humide de croissance.
- Le givre lourd est moins transparent que le verglas et quelquefois opaque, suivant la quantité d'air contenue dans la glace. Sa masse volumique varie de  $0,6$  à  $0,8 \text{ g/cm}^3$ .
- Le givre léger est une glace blanche et opaque. Il est d'apparence granulaire ou en aiguilles, avec une masse volumique plus faible que  $0,6 \text{ g/cm}^3$ . On appelle également givre mou la glace qui provient de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique, que l'on désigne sous le nom de gelée blanche.

Le type de glace obtenu dépend principalement du contexte particulier de formation que l'on décrit en termes de quatre paramètres appelés paramètres météorologiques. Par ordre d'importance on a :

- la température de l'air ( $^{\circ}\text{C}$ )
- la vitesse du vent ( $\text{m/s}$ )
- le diamètre volumique moyen des gouttelettes ( $\mu\text{m}$ )
- la teneur en eau liquide de l'air ( $\text{g/m}^3$ )

### 3.3 Formation en laboratoire

Tous les essais de cette recherche ont été effectués avec de la glace atmosphérique formée en laboratoire. Des recherches du GRIEA ont démontré que la glace atmosphérique formée à basse température donnait une glace opaque et granuleuse, tandis qu'à une température voisine de 0°C la glace devenait claire et lisse.

Les recherches antérieures ont démontré que c'est aux environs d'une température de -14°C et d'une vitesse de vent de 23m/s que la résistance de la glace atmosphérique est maximum (Druez et al., 1989).

D'autres recherches du GRIEA concernant la microstructure de la glace atmosphérique (Laforte et Nguyen, 1985) ont démontré que plus la glace est formée à basse température et à haute vitesse de vent, plus les grains sont petits (coupe tangentielle du manchon) et sous forme d'aiguilles (coupe radiale du manchon). Également, on a constaté que plus les températures sont près de 0°C, plus les grains sont gros et de formes allongées. La description ci-dessous montre les différentes conditions expérimentales utilisées par le GRIEA concernant les essais de traction réalisés en laboratoire.

1<sup>ère</sup> série d'essais: (un essai par condition, total d'environ 80 essais)

Diamètre volumique moyen : 40  $\mu\text{m}$

Teneur en eau : 0,8 g/m<sup>3</sup>

Température : -3, -8, -14, -20 °C  
 Vitesse du vent : 10, 16, 23 m/s  
 Taux de déformation variant de :  $1,88 \times 10^{-3}$  à  $8,70 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1}$

2<sup>e</sup> série d'essais: (2 à 3 essais par condition, total d'environ 120 essais)

Diamètre volumique moyen : 40  $\mu\text{m}$   
 Teneur en eau : 1,2 g/m<sup>3</sup>  
 Température : -8, -14, -20 °C  
 Vitesse du vent : 16, 23 m/s  
 Taux de déformation variant de :  $1,88 \times 10^{-3}$  à  $7,25 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$

(Les résultats de ces essais, retenus pour fins de comparaison, sont présentés aux tables 2, 3, 4 et 5).

Étant donnée l'ampleur du travail nécessaire pour effectuer plusieurs essais par condition et tenir compte de tous les paramètres météorologiques, les essais utilisant le montage faisant l'objet de cette recherche furent réduits à une seule condition de formation, avec de un (1) à trois (3) essais de traction par taux de déformation.

Pour faire une étude comparative intéressante, on a choisi comme condition de formation celle dont les essais réalisés étaient les plus nombreux et où la résistance de la glace atmosphérique mesurée était la plus élevée, car ce sont souvent les cas extrêmes de résistance qui nous intéressent pour les applications en ingénierie. Il s'agit de la condition de formation suivante :

Diamètre volumique moyen :	40 $\mu\text{m}$
Teneur en eau :	1,2 $\text{g}/\text{m}^3$
Température :	-14 $^{\circ}\text{C}$
Vitesse du vent :	23 $\text{m}/\text{s}$
Taux de déformation variant de :	4.17 $\times 10^{-2}$ à 8.33 $\times 10^{-8}$ $\text{s}^{-1}$

Quelques essais ont été effectués à d'autres conditions de formation pour fins de comparaisons, soit :

Diamètre volumique moyen des gouttelettes :	40 $\mu\text{m}$
Teneur en eau :	1,2 $\text{g}/\text{m}^3$
Températures -8 et -20 $^{\circ}\text{C}$ avec la vitesse du vent égale à :	23 $\text{m}/\text{s}$
Températures -14 $^{\circ}\text{C}$ avec la vitesse du vent égale à :	16 $\text{m}/\text{s}$
Taux de déformation	8.33 $\times 10^{-8}$ $\text{s}^{-1}$
	5.00 $\times 10^{-6}$ $\text{s}^{-1}$
	4.17 $\times 10^{-2}$ $\text{s}^{-1}$

Ces essais ont été effectués une seule fois par condition.

## CHAPITRE IV

### RÉSULTATS ET DISCUSSION

#### 4.1 Essais préliminaires

##### 4.1.1 Essais de traction avec jauges de déformation (ancien montage)

Les résultats des 4 essais de traction effectués avec l'ancien montage et utilisant des jauges de déformation sont présentés aux figures 9 et 10. Pour faire une brève analyse, on peut nettement remarquer que la déformation instantanée au centre du manchon de glace (jauges CC, essais #1 et #2, figure 9; jauges DD, essais #3 et #4, figure 10) est plus élevée qu'aux autres endroits. Cela s'explique par le fait que lors de l'essai de traction, la glace tend à coller sur les parties polies des douilles d'aluminium sauf au centre (i.e. à l'interface des deux douilles d'aluminium).

Si on calcule le taux de déformation en ce point critique du manchon de glace, pour les 4 essais de traction (équation 1.3.2.3), on obtient :

Essai #1 :  $\dot{\epsilon} = 0.53 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$   
 Temps de rupture = 530 s

Essai #2 :  $\dot{\epsilon} = 3.52 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$   
 Temps de rupture = 800 s

Essai #3 :  $\dot{\epsilon} = 1.00 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$   
 Temps de rupture = 400 s

Essai #4 :  $\dot{\epsilon} = 0.82 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$   
 Temps de rupture = 560 s

La vitesse de la traverse étant de 0,12 mm/min pour une longueur de déformation (longueur de l'échantillon de glace) déjà établie à 23cm (Druez et al., 1986), on obtient un taux de déformation nominal  $\dot{\epsilon} = 8.69 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  (équation 1.3.2.1).

Si on compare cette valeur théorique aux valeurs mesurées avec les jauges de déformation, nous remarquons qu'elle est plus élevée que les valeurs mesurées avec les jauges. Cela signifie que la méthode de collage des jauges n'est pas adéquate. Cependant, l'application de cette méthode, combinée avec l'utilisation d'un extensomètre sur le nouveau montage, permettrait d'obtenir plus d'informations au sujet du collage des jauges.

Ainsi, ces essais préliminaires de traction nous permettent de voir certains problèmes à propos de ce montage de mesure de la résistance à la traction de la glace atmosphérique, soit:

- que l'adhésion sur la partie polie implique que le taux de déformation varie le long du manchon de glace.
- que l'effet de Poisson augmente la friction entre la glace et l'aluminium dû à un serrage à l'interface glace et aluminium.
- que la traction se faisant par l'intérieur du manchon de glace, ceci nous porte à croire qu'il y a une mauvaise répartition des charges sur la section de glace considérée, donc une variation des contraintes dans le sens radial des échantillons de glace.

#### **4.1.2 Essais de traction (nouveau montage avec coupoles)**

Le premier objectif de notre travail était de retirer la douille d'aluminium du centre du manchon de glace en raison des problèmes mentionnés. Les figures 24 et 25 démontrent bien l'atteinte de cet objectif compte tenu qu'il était nécessaire d'appliquer une charge plus uniformément répartie. De plus, pour assurer une rupture au centre du cylindre de glace, deux coupoles cylindriques (10) ont été placées à chaque extrémité (figure 30) et de l'eau froide a été versée entre la coupole et la glace (figures 31 et 32). Sachant qu'il y a expansion de l'eau lors de sa cristallisation, les parties extrêmes où se situent les coupoles

deviennent alors beaucoup plus rigides que la partie centrale évidée au centre, localisant la rupture dans cette partie centrale.

Les résultats obtenus avec ce montage sont présentés à la table 6. La figure 33 montre la résistance à la traction en fonction du taux de déformation .

Ce type d'essai est très long à réaliser étant donné qu'il est nécessaire d'attendre un délai minimum de 10 heures pour le gel de l'eau de la première coupole avant de pouvoir insérer l'eau froide à l'intérieur de la deuxième coupole. Un essai de traction nécessite un temps de manipulation de deux (2) jours pour obtenir une mesure. Dix-sept (17) essais ont été réalisés à l'aide de ce montage, ce qui représente donc trente-quatre (34) jours de travail, sans compter les essais manqués en raison d'erreurs de manipulation.

Étant donné la durée des essais de traction avec les coupoles, on a réalisé une série d'essais sans les coupoles pour fins de comparaison. Les résultats obtenus sont présentés à la table 7. La figure 34 montre qu'il n'y a pas de différence significative et cela s'explique par le fait que l'épaisseur du manchon de glace est faible et que la charge de traction est située presque sur l'axe central du manchon (figure 35). Ces essais ont aussi montré que lorsque l'épaisseur du manchon de glace est augmentée au centre, il y a une moins bonne répartition des charges, et la rupture fragile se produit près du rayon de raccordement de 5 mm. Donc, avec ce montage, l'épaisseur de la glace ne devait pas dépasser 8 mm pour avoir des résultats satisfaisants sans les coupoles.

Nous tenons à préciser que l'utilisation des coupoles lors des essais de traction serait plus logique que des essais sans coupoles, étant donné que la distribution des charges doit être le mieux répartie possible sur la section de glace considérée. Par contre, les essais ont montré qu'en respectant une épaisseur maximum de 8 mm, on obtient des résultats similaires.

#### **4.2 Essais de traction (nouveau montage sans coupoles)**

Suite aux essais préliminaires, des essais de traction ont été effectués à partir du montage sans les coupoles étant donné que les résultats étaient presque les mêmes qu'avec les coupoles. On a ainsi pu doubler la quantité d'essais pour le même temps. Quelques 30 essais ont été réalisés avec une épaisseur de glace inférieure à 8mm. Les résultats obtenus sont présentés aux tables 7 et 8. La figure 36 montre la variation de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation.

#### **4.3 Comportement général de la glace atmosphérique**

Les études sur la mesure de la résistance à la traction de la glace atmosphérique en fonction du taux de déformation (Druez et al., 1989, 1988, 1987), (Chu et al., 1988) démontrent un comportement ductile de la glace à fluage plastique. Comme la glace ne possède pas de contrainte critique délimitant un seuil d'écoulement ductile - son comportement étant fonction du taux de déformation ou d'application des contraintes - on peut ainsi observer que plus les taux de déformation sont faibles, plus la glace démontrera une grande ductilité dans ses déformations passant par un fluage plastique jusqu'à un

écoulement visqueux pour les très faibles taux de déformation. Aussi, plus le taux de déformation est élevé, plus on tend vers le domaine fragile. Il est démontré qu'entre le domaine fragile et le domaine ductile, une zone de transition existe et est confirmée par les résultats de nos essais (figure 36).

Aussi, pour les taux de déformation d'environ  $10^{-7} \text{ s}^{-1}$ , les essais auraient duré plus de 30 heures. Une accélération de la vitesse de chargement sur les montages de mesure a donc été réalisée au moment où la charge atteignait la limite d'écoulement visqueux.

#### **4.4 Analyse des résultats et comparaison avec les essais antérieurs**

##### **4.4.1 Effet du taux de déformation**

C'est à une température de  $-14 \text{ }^{\circ}\text{C}$  et pour une vitesse du vent de  $23 \text{ m/s}$ , avec un diamètre volumique moyen des gouttelettes  $d = 40 \text{ }\mu\text{m}$  et une teneur en eau de  $1,2 \text{ g/m}^3$  qu'il y a eu le plus d'essais de traction réalisés. La figure 37 montre la comparaison des résultats entre l'ancien montage et le nouveau. Les essais précédents effectués à l'Université du Québec à Chicoutimi ont montré que c'est pour ces conditions de formation que la résistance de la glace atteint son maximum. La valeur maximum moyenne mesurée est  $4,5 \text{ MPa}$  avec l'ancien montage, comparativement à  $1,87 \text{ MPa}$  avec le nouveau montage. Le taux de déformation interpolé correspondant est environ  $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ .

Cette diminution importante de la résistance mesurée avec le nouveau montage peut s'expliquer par différents phénomènes.

- 1- L'adhésion de la glace sur les douilles d'aluminium centrales de l'ancien montage.
- 2- Le phénomène de contraction lors de l'essai de traction qui tend à faire coller la glace sur la surface cylindrique d'aluminium (ancien montage).
- 3- La déformation relative réelle plus importante au centre du manchon de glace (ancien montage) comparativement à une déformation supposée plus uniformément répartie (nouveau montage) sur la longueur de glace considérée (figure 35).

Le taux de déformation étant variable sur toute la longueur du manchon de glace atmosphérique avec l'ancien montage (figures 9 et 10), nous croyons qu'il dépend aussi des paramètres de formation de la glace (surtout la température et la vitesse du vent) pour un taux de déformation théorique donné. En fait, on sait que l'adhésion de la glace sur l'aluminium varie suivant les conditions de formation de la glace atmosphérique (Druez et al., 1986). Ces effets ne s'appliquent pas pour le nouveau montage étant donné qu'on a éliminé le cylindre d'aluminium dans la section de glace considérée et qu'il n'y a donc aucune adhésion.

On peut remarquer qu'il y a une différence de résistance plus importante pour les taux de déformation lents, soit entre  $10^{-7}$  et  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (figure 37). En effet,

plus on tend vers les taux de déformation lents (domaine ductile), plus la différence est grande entre les deux montages d'essai de traction. Cela peut s'expliquer par le fait que la glace adhère sur la surface d'aluminium dans le cas de l'ancien montage. De plus, on a pu constater une différence de temps importante entre le début des essais et la rupture de la glace pour les deux montages. Par exemple, pour une vitesse de la traverse de 0,012 mm/min, le temps nécessaire avant rupture est environ 1 h 10 min pour le nouveau montage comparativement à environ 30 min pour l'ancien montage.

Si on analyse le graphique de la figure 38 montrant les valeurs moyennes et les écarts types ( $T = -14^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 23 \text{ m/s}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $d = 40 \text{ }\mu\text{m}$ ) et les figures 47 et 48 représentant les modèles développés dans le chapitre 5, on remarque que plus on tend vers le domaine fragile, plus les droites tendent à se rejoindre.

D'autre part, plus on entre dans le domaine plastique, plus la différence entre les deux montages est grande. En effet, on note un écart de résistance de plus de 100 % dans le domaine ductile, pour le plus faible taux de déformation. De plus, on peut faire à peu près les mêmes observations pour une vitesse de vent plus faible (figure 41,  $T = -14^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 16 \text{ m/s}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $d = 40 \text{ }\mu\text{m}$ ), bien que cette comparaison soit limitée à quelques valeurs seulement.

Une autre comparaison importante entre les résultats des deux montages (tables 4 et 7) montre que la moyenne des écarts types pour l'ancien montage est plus élevée que pour le nouveau montage, soit  $\pm 0,44 \text{ MPa}$  comparativement à  $\pm 0,22 \text{ MPa}$  pour le nouveau montage. Cela implique que ce dernier offre des résultats plus constants, bien qu'il y ait moins d'essais effectués avec le nouveau

montage. Par contre, la différence entre les écarts types n'est pas aussi évidente sur la figure 38 parce que la résistance à la traction de la glace atmosphérique est montrée sur une échelle logarithmique. En effet, l'étendue graphique des écarts types est plus faible pour les résistances plus élevées en raison de l'échelle logarithmique.

Si on regarde le comportement général de la glace atmosphérique en fonction du taux de déformation à d'autres conditions de formation (figure 39,  $T = -20^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 23 \text{ m/s}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $d = 40 \mu\text{m}$ ), (figure 40,  $T = -8^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 23 \text{ m/s}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $d = 40 \mu\text{m}$ ), (figure 41,  $T = -14^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 16 \text{ m/s}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $d = 40 \mu\text{m}$ ), on remarque que dans le domaine fragile, on obtient des résultats presque équivalents à l'ancien montage. Ceci est vrai, sauf pour une température de  $-8^{\circ}\text{C}$  et une vitesse de vent égale à  $23 \text{ m/s}$ , où l'on dénote une bonne différence quel que soit le taux de déformation. Cela peut s'expliquer parce qu'à cette température, l'adhésion sur l'aluminium (ancien montage) n'a pas la même importance qu'à des températures de  $-14^{\circ}\text{C}$  ou  $-20^{\circ}\text{C}$ , pour une vitesse de vent égale à  $23 \text{ m/s}$ . En effet, à cette condition de formation (figure 40,  $T = -8^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 23 \text{ m/s}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $d = 40 \mu\text{m}$ ), les résultats de l'ancien montage ne varient presque pas avec le taux de déformation. Par contre, avec le nouveau montage on dénote un grand changement entre le domaine ductile et le domaine fragile.

Cependant, il faut noter que les résultats du nouveau montage sont basés sur un seul point et vu la faible quantité de mesures réalisées, il est difficile de conclure sur ces résultats. Ces résultats nous offrent tout de même une idée générale sur le comportement de la glace atmosphérique à ces conditions de formation.

#### **4.4.2 Effet de la température de formation de la glace**

La figure 42 montre la variation de la résistance en traction de la glace atmosphérique en fonction de la température (ancien et nouveau montages) pour une teneur en eau de  $1,2 \text{ g/m}^3$  et une vitesse de vent égale à  $23 \text{ m/s}$ . Le taux de déformation utilisé est celui correspondant à la résistance maximum observée avec le nouveau montage soit  $5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ .

On remarque principalement que la résistance en traction de la glace atmosphérique atteint son maximum aux environs de  $-14 \text{ }^\circ\text{C}$  quel que soit le type de montage utilisé. En conséquence, la résistance à la traction est moins élevée aussi bien à  $-8 \text{ }^\circ\text{C}$  qu'à  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ , pour les deux montages.

Suivant la température, la résistance en traction de la glace atmosphérique est de 70 à 200% plus élevée pour les mesures effectuées avec l'ancien montage par rapport au nouveau. Ces résultats sont toutefois obtenus avec un nombre limité d'essais dans le cas du nouveau montage.

#### **4.4.3 Effet de la vitesse du vent lors de la formation de glace**

La figure 43 montre la variation de la résistance en traction de la glace atmosphérique en fonction de la vitesse du vent (ancien et nouveau montages) pour une teneur en eau de  $1,2 \text{ g/m}^3$  et une température de  $-14^\circ\text{C}$ . Le taux de déformation utilisé est celui correspondant à la résistance maximum observée avec le nouveau montage soit  $5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ .

La plupart des essais de traction ont été réalisés avec une vitesse de vent égale à 23 m/s parce que la résistance maximum de la glace a été mesurée précédemment à cette condition de formation, avec une teneur en eau de 1,2 g/m<sup>3</sup> (Druetz et al., 1989). En effet, on remarque sur ce graphique que la résistance maximum a été atteinte pour une vitesse de vent de 23 m/s.

Trois essais par condition au minimum devraient toujours être complétés pour établir une moyenne et un écart type. D'autre part, les quelques essais réalisés à des conditions autres qu'une température de -14°C avec une vitesse de vent égale à 23 m/s, ne permettent pas d'effectuer une analyse valable concernant l'effet de la vitesse du vent.

## CHAPITRE V

### MODÉLISATION EMPIRIQUE ET VALIDATION DES RÉSULTATS

#### 5.1 Modélisation empirique des résultats

Étant donné que la plupart des essais de traction ont été effectués à une température de  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  et une vitesse du vent de  $23\text{ m/s}$ , avec un diamètre volumique moyen de gouttelettes  $d = 40\text{ }\mu\text{m}$  et une teneur en eau de  $1,2\text{ g/m}^3$ , seuls les modèles correspondant à ces conditions seront présentés dans ce travail. Ils couvrent une gamme de taux de déformation variant de  $4,17 \times 10^{-2}$  à  $8,33 \times 10^{-8}\text{ s}^{-1}$ .

La méthode utilisée pour trouver les équations paramétriques passant par les points de mesure est celle des moindres carrés. En fonction des résultats des mesures, deux équations linéaires ont été calculées pour tracer chaque droite en échelles logarithmiques. Une des équations correspond au domaine ductile et l'autre correspond au domaine fragile, tel que décrit au paragraphe 1.2 et analysé au paragraphe 4.4.

### 5.1.1 Modèles empiriques correspondant à l'ancien montage

Pour le domaine ductile, nous avons pris les résultats de la résistance à la traction correspondant aux taux de déformation inférieurs ou égaux à  $1,74 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ . L'équation paramétrique calculée est :

$$\sigma(\dot{\epsilon}) = 10^{(3,46 + 0,48 \times \text{LOG}(\dot{\epsilon}))} \quad (5.1.1.1)$$

Le coefficient de corrélation correspondant est 0,93

Pour le domaine fragile, nous avons pris les résultats de la résistance à la traction correspondant aux taux de déformation supérieurs ou égaux à  $1,74 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ . L'équation paramétrique calculée est :

$$\sigma(\dot{\epsilon}) = 10^{(-0,36 - 0,16 \times \text{LOG}(\dot{\epsilon}))} \quad (5.1.1.2)$$

Le coefficient de corrélation correspondant est dans ce cas seulement 0,589

La figure 44 présente le résultat de l'application de ces modèles correspondant au comportement de la glace atmosphérique en traction (ancien montage) pour les conditions de formation mentionnées au début du paragraphe 5.1.

### 5.1.2 Modèles empiriques correspondant au nouveau montage

Pour le nouveau montage, deux modèles sont présentés. Un des modèles correspond seulement aux résultats du nouveau montage sans les coupes, et

l'autre comprend les résultats des essais de traction avec les coupoles combinés avec ceux sans les coupoles. Ce dernier est présenté ici parce que les résultats des deux séries d'essais (avec et sans coupoles) ne présentent pas beaucoup de différence, tout en permettant d'évaluer l'effet des coupoles.

### 5.1.2.1 Modèles sans les coupoles

Pour le domaine ductile, nous avons pris les résultats de la résistance à la traction correspondant aux taux de déformation inférieurs ou égaux à  $2,5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ . L'équation paramétrique calculée est :

$$\sigma(\dot{\epsilon}) = 10^{(2,29 + 0,36 \times \text{LOG}(\dot{\epsilon}))} \quad (5.1.2.1.1)$$

Le coefficient de corrélation correspondant est 0,90

Pour le domaine fragile, nous avons pris les résultats de la résistance à la traction correspondant aux taux de déformation supérieurs ou égaux à  $2,5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ . L'équation paramétrique calculée est :

$$\sigma(\dot{\epsilon}) = 10^{(-0,18 - 0,085 \times \text{LOG}(\dot{\epsilon}))} \quad (5.1.2.1.2)$$

Le coefficient de corrélation correspondant est 0,53

La figure 45 présente le résultat de l'application de ces modèles correspondant au comportement de la glace atmosphérique en traction (nouveau montage sans les coupoles) pour les conditions de formation mentionnées au début du paragraphe 5.1.

### 5.1.2.2 Modèles combinés, montages avec et sans les coupoles

Pour le domaine ductile, nous avons pris les résultats de la résistance à la traction correspondant aux taux de déformation inférieurs ou égaux à  $3,33 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ . L'équation paramétrique calculée est :

$$\sigma(\varepsilon) = 10^{(1,74 + 0,27 \times \text{LOG}(\dot{\varepsilon}))} \quad (5.1.2.2.1)$$

Le coefficient de corrélation correspondant est 0,70

Pour le domaine fragile, nous avons pris les résultats de la résistance à la traction correspondant aux taux de déformation supérieurs ou égaux à  $3,33 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ . L'équation paramétrique calculée est :

$$\sigma(\varepsilon) = 10^{(-0,11 - 0,064 \times \text{LOG}(\dot{\varepsilon}))} \quad (5.1.2.2.2)$$

Le coefficient de corrélation correspondant est seulement 0,34

La figure 46 présente le résultat de l'application de ces modèles correspondant au comportement de la glace atmosphérique en traction (nouveau montage, résultats combinés avec et sans les coupoles) pour les conditions de formation mentionnées au début du paragraphe 5.1.

La figure 47 permet de comparer les modèles du nouveau montage sans les coupoles et de l'ancien montage. La figure 48 permet de comparer les modèles correspondant au nouveau montage combiné (avec et sans les coupoles) et ceux correspondant à l'ancien montage. Les coefficients de

corrélation nous indiquent bien sûr que le fait de combiner les résultats des montages (avec et sans les coupoles), diminue sensiblement la corrélation.

La figure 47 montre qu'il y a une différence assez importante entre les modèles des deux montages. Cette différence est attribuable aux phénomènes discutés au paragraphe 4.4.

Il faut noter que certains points sur les graphiques pourraient être à éliminer en raison d'erreurs de manipulation dues au manque d'expérience. Cependant, les tendances illustrées par les différents modèles sont très semblables d'un cas à l'autre.

## **5.2 Validation des résultats d'essai**

Nous avons déjà mentionné que peu d'études portant sur les propriétés mécaniques de la glace atmosphérique ont été réalisées. En fait, le GRIEA de l'Université du Québec à Chicoutimi est le seul groupe de recherche capable de produire, conserver et faire des mesures sur ce type de glace en laboratoire. Quelques modèles montrant le comportement de la glace atmosphérique en traction, en compression et en adhésion ont été présentés dans la littérature (Druez et al., 1987, 1986a, 1986b) et ils constituent les principales références en rapport avec ce mémoire de maîtrise. D'autres modèles ont été présentés par d'autres chercheurs (Michel, 1978; Carter, 1970; Ramseier, 1970) mais ils correspondent aux propriétés mécaniques de la glace ordinaire, la glace d'eau douce ou la glace de mer.

D'après cette littérature, nous pouvons dire que les modèles présentés ici, concernant la résistance à la traction de la glace atmosphérique (pour une température de  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  et une vitesse du vent de  $23\text{ m/s}$ , avec un diamètre volumique moyen de gouttelettes  $d = 40\text{ }\mu\text{m}$  et une teneur en eau de  $1,2\text{ g/m}^3$ ), correspondent généralement aux observations déjà effectuées dans les domaines de rupture théorique et pratique pour les différents types de glace. En fait, toutes les observations montrent une délimitation entre la zone ductile et la zone fragile qui se situe entre  $10^{-6}$  et  $2,5 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ . Seules les équations des modèles diffèrent d'un type de glace à l'autre, étant donné que la structure de la glace change en fonction des paramètres de formation de la glace.

D'autres modèles, correspondants à des conditions de formation différentes, pourront faire l'objet d'une recherche plus complète avec le nouveau montage développé dans le cadre de ce travail.

## CONCLUSIONS

- 1- Le nouveau montage développé dans le cadre de ce travail de maîtrise a permis d'éliminer les effets d'adhésion et de serrage au centre des échantillons de glace étant donné que l'on retire les douilles centrales. Il permet d'appliquer une charge plus uniformément répartie sur la section de glace et il offre un taux de déformation à peu près constant sur toute la longueur de l'échantillon considéré.
- 2- Le nouveau montage offre des résultats plus constants (i.e. l'écart type moyen est environ 2 fois plus petit que pour l'ancien montage). Trois essais par condition au minimum devraient toujours être complétés pour établir une moyenne et un écart type représentatifs.
- 3- Avec un diamètre volumique moyen de gouttelettes  $d = 40 \mu\text{m}$  et une teneur en eau  $w=1,2 \text{ g/m}^3$ , c'est à une température de  $-14 \text{ }^\circ\text{C}$  et à une vitesse de vent de  $23 \text{ m/s}$  que la résistance à la traction de la glace atmosphérique la plus élevée a été mesurée. C'est à ces conditions de formation qu'on obtient une valeur maximum moyenne de  $1,87 \text{ MPa}$  avec le nouveau montage, comparativement à  $4,5 \text{ MPa}$  avec l'ancien montage. Le taux de déformation interpolé correspondant est environ  $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ .

- 4- En fonction de la température, la résistance en traction de la glace atmosphérique passe par un maximum à  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ , et les valeurs mesurées avec le nouveau montage sont environ 50% plus faibles qu'avec l'ancien montage.
  
- 5- Les modèles empiriques développés ont montré que la résistance à la traction de la glace atmosphérique augmente avec le taux de déformation pour le domaine ductile, i.e. pour les taux de déformation inférieurs à environ  $2 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1}$ . La résistance à la traction diminue avec les taux de déformation plus élevés correspondant au domaine fragile.
  
- 6- Avec l'utilisation de ce nouveau montage de mesure de la résistance à la traction, il est possible de mesurer les constantes élastiques (E, G,  $\nu$ ) de la glace atmosphérique à l'aide de jauges de déformation ou d'un extensomètre, en raison de l'absence du cylindre d'aluminium à l'intérieur du manchon de glace.

## RECOMMANDATIONS

- 1- Le montage développé dans le cadre de cette maîtrise nécessite beaucoup de minutie. Le fait d'éliminer l'utilisation des coupoles diminue les risques de cassures accidentelles puisqu'on diminue les manipulations et le poids du montage.
- 2- Une épaisseur maximum de glace de 8 mm doit être respectée après usinage, dans le cas du nouveau montage sans les coupoles, afin d'éviter les ruptures fragiles au niveau des rayons de raccordement des éprouvettes.
- 3- Deux ou trois autres points de mesure doivent être ajoutés à la gamme des taux de déformation entre  $2,5 \times 10^{-6}$  et  $2,0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  pour bien modéliser la zone de transition entre la zone ductile et la zone fragile. Également, deux ou trois autres points de mesure doivent être ajoutés pour des taux de déformation supérieurs à  $2,0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  afin d'établir une troisième équation (domaine fragile) pour chaque modèle
- 4- Nous croyons que trois essais par condition au minimum devraient toujours être complétés pour établir une moyenne et un écart type significatifs.

- 5- Les séries d'essais de traction devront être complétées pour les nouveaux taux de déformation choisis ainsi que pour les températures correspondant aux essais antérieurs. Des modèles pourront être développés et ils représenteront alors le comportement de la résistance à la traction de la glace atmosphérique avec davantage de précision.
- 6- Des essais de traction devraient être réalisés à d'autres vitesses de vent soit 8 m/s et 30 m/s afin d'établir une relation plus concluante concernant la résistance en traction de la glace atmosphérique en fonction de la vitesse du vent. La soufflerie actuelle ne permet pas d'atteindre des vitesses de vent supérieures à 23 m/s à moins de modifier sa section d'essais, ou d'utiliser la soufflerie réfrigérée.
- 7- Le calcul du taux de déformation devrait toujours être fait à partir des mesures prises par l'extensomètre et non basé sur la vitesse de la traverse, afin d'éliminer l'effet des jeux et des déformations dans le mécanisme d'attache et le système de mise en charge.
- 8- Un modèle d'analyse par éléments finis permettrait de vérifier les hypothèses décrites dans le paragraphe 4.4.1 et de mieux visualiser la distribution des contraintes et des déformations, en appliquant les mêmes conditions de chargement que dans les montages réels.

- 9- Pour réaliser des essais à très basse vitesse sur la glace atmosphérique, essais qui durent plusieurs jours, la presse mécanique pourrait être installée à l'extérieur de la chambre froide, dans une enceinte à température contrôlée indépendante ayant un accès direct avec la chambre froide. Une enceinte climatique de la dimension de l'échantillon pourrait aussi être installée sur la presse qui serait alors localisée à l'extérieur de la chambre froide servant à la fabrication des échantillons de glace.

## BIBLIOGRAPHIE

- Brouillet, G., 1988, "Rapport d'analyse de la panne du 18 avril 1988", Hydro-  
Presse, Hydro-Québec, Montréal (Canada), juin, page 7.
- Carter, D., 1970, "Étude du comportement fragile de la glace d'eau douce",  
Mémoire de doctorat, Université Laval.
- Chu, M. I., Xian, X. T., Scavuzzo, R. J., 1988, "Détermination des propriétés  
mécaniques de la glace accumulée par une méthode combinant calculs aux  
éléments finis et expériences", Quatrième Congrès International sur le  
Givrage Atmosphérique des Structures, Paris 5-7 sept. 1988, pp. 254-258.
- Druetz, J., Claveau, L., Tremblay, C., 1987, "La mesure de la résistance en  
traction de la glace atmosphérique", Comptes rendus du onzième  
Congrès Canadien de Mécanique Appliquée, Université d'Alberta,  
Edmonton, 31 mai-4 juin, pp. 236-237.
- Druetz, J., Cloutier, J., Claveau, L., 1987, "Étude comparative de la résistance à la  
traction et à la compression de la glace atmosphérique" , Journal de  
physique, Colloque C1, tome 48, pp. 337-343.

- Druez, J., Laforte J. L., Tremblay, C., 1989, "Experimental Results on the Tensile Strength of Atmospheric Ice", Proc. of Eighth International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, The Hague, March 19-23, pp. 405-410.
- Druez, J., McComber, P., Lavoie, Y., 1986, "Compressive Strength Measurements on Atmospheric Ice", Proceedings of 3rd Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Vancouver (C. B.), Canada, Mai 6-8, paper 5-1, 6 pages.
- Druez J., McComber P., Tremblay, C., 1989, "Experimental Results on the Tensile Strength of Atmospheric Ice", Transactions of CSME, Vol. 13, No. 3, pp 59-64.
- Druez, J., Nguyen, D.D., Lavoie, Y., 1986, "Mechanical Properties of Atmospheric Ice", Cold Regions Science and Technology J., Vol. 13, pp. 67-74.
- Druez, J., Phan, C.L., Laforte, J.L., Nguyen, D.D., 1979, "The Adhesion of Glaze and Rime on Aluminium Electrical Conductors", Transactions of CSME, Vol. 5, pp. 215-220.
- Druez, J., Tremblay, C., 1988, "Méthode de mesure des propriétés mécaniques du givre et du verglas", 56<sup>e</sup> congrès de l'ACFAS, Recueil des résumés de communications, Université de Moncton, Vol. 56, 9-13 mai, p. 103.

- Druez, J., Tremblay, C., 1987, "Contrôle de la formation de givre et de verglas à l'aide d'un micro-ordinateur", 55<sup>e</sup> congrès de l'ACFAS, Recueil des résumés de communications, Université d'Ottawa, Vol. 55, 19-22 mai, p. 166.
- Ervik, M., Editeur, 1987, "Proceedings of Second International Workshop on Atmospheric Icing of Structures", June 19-21, 1984, Trondheim (Norway), EFI Technical Report 3439.
- Hydro-Press, 1984, Hydro-Québec, Montréal (Canada), vol. 64, no 1, page 6.
- Kenneth, A., 1951, "Use of Ice as a Load-Supporting Surface", American Society of Civ. Eng., 23 Oct. 1951.
- Lafleur, P., 1970, "Propriétés mécaniques de la glace de neige en flexion", Mémoire de maîtrise, Université Laval.
- Laforte, J.L., 1988, "Technologie de l'environnement nordique", Cours de Maîtrise en ressources et systèmes 6MRS918, Aut. 88, Dép. des sciences appliquées, U.Q.A.C.
- Laforte, J.L., Nguyen, D.D., 1988, "Résultats comparatifs de la mesure des dimensions de gouttelettes au moyen de trois méthodes d'impaction" Quatrième Congrès International sur le Givrage Atmosphérique des Structures, Paris 5-7 sept. 1988, pp. 263-267.

Laforte, J.L., Nguyen, D.D., 1985, "Microstructure of Atmospheric Ice Grown on Aluminium Conductor in Relation with Adhesive and Compressive Strengths", Proceedings of 10th Canadian Congress of Applied Mechanics, London (Ontario), Canada, June 2-7, Vol. 1, pp. A.343-A.344.

Michel, B., 1978, "Ice Mechanics", Les Presses de l'Université Laval, 500 pages et illustrations. Aussi en français, "Cours de mécanique des glaces", Dép. de génie civil, Université Laval, Québec.

Michel, B., Drouin, M., 1971, "Les propriétés mécaniques à l'impact de la glace du Saint Laurent", Rapport T-19, Dép. génie civil, Université Laval, Québec (Canada).

Minsk, L.D., Editeur, 1983, "Proceedings of First International Workshop on Atmospheric Icing of Structures", 1-3 June 1982, Hanover (N.H.), U.S.A., CRREL Special Report 83-17.

Ramseier, R. O., 1970, "Propriétés rhéologiques de la glace d'eau douce", Mémoire de doctorat, Université Laval.

Shigley, J. E., Mitchell, L. D., 1983, "Mechanical Engineering Design", Fourth Edition, McGraw-Hill Book Company, 869 p.

Sinha, N.K., 1989, "Use of Foil Strain Gauges in Ice Over a Wide Loading Rate", Cold Regions Science and Technology Journal, 16 (1989), pp. 145-158.

Stallabrass, J.R., 1983, "Aspects of Freezing Rain Simulation and Testing", U.S. Army Corps of Engineers, CRREL 83-17, pp. 67-74.

Stallabrass, J. R., Price, R.D., 1963, "On the Adhesion of Ice to Various Materials", Can. Aero. and Space J., Vol. 9, pp. 199-204.

## **ANNEXE 1**

TABLE 1 : VITESSES DE LA TRAVERSE A 100% PLEINE ECHELLE *							
POSITION ENGRENAGE	SELECTEUR	"LOW"		"MEDIUM"		"HIGH"	
	RAPPORT	po/min	mm/min	po/min	mm/min	po/min	mm/min
A	** 10:1 **	0.02	0,508	0.2	5,08	20.0	508
B	** 100:1 **	0.002	0,0508	0.02	0,508	20.0	508
C	** 1000:1 **	0.0002	0,00508	0.002	0,0508	20.0	508
D	** 1:1 **	0.2	5,08	2.0	50,8	20.0	508

\* A 100 % PLEINE ECHELLE, ON A (POSITION "C" ET SELECTEUR "LOW") : 0,005 mm/min

A 1 % PLEINE ECHELLE, ON A (POSITION "C" ET SELECTEUR "LOW") : 0,00005 mm/min

TABLE 2 : Résistance à la traction (MPa) en fonction du taux de déformation Ancien montage (d = 40 µm; w = 1,2 g/m3)					
Taux de déformation (1/sec.)	Essai #1 V = 23 m/s; T = -14 degré C	Essai #2 V = 23 m/s; T = -14 degré C	Essai #3 V = 23 m/s; T = -14 degré C	Moyenne	Ecart type
7,25E-08	0,91	0,97	0,99	0,96	0,04
4,35E-07	1,85	2,62	3,20	2,56	0,67
8,70E-07	2,53	3,02	3,24	2,93	0,36
1,30E-06	4,50	3,43	4,77	4,23	0,71
1,74E-06	5,00	4,59	3,96	4,52	0,53
4,35E-06	2,44	3,07	3,45	2,99	0,51
8,70E-06	3,26	3,19	2,36	2,93	0,50
3,26E-05	2,44	2,24	1,94	2,20	0,25
2,17E-04	3,08	3,32	3,67	3,36	0,30
8,12E-04	0,70	1,30	1,29	1,09	0,34
1,88E-03	0,98	0,71	1,34	1,01	0,32
7,25E-03	1,77	0,54	1,95	1,42	0,77

<b>TABLE 3 : Résistance à la traction (MPa) en fonction du taux de déformation Ancien montage (d = 40 µm; w = 1,2 g/m<sup>3</sup>)</b>			
<b>Taux de déformation (1/sec.)</b>	<b>Essai #1 V = 23 m/s; T = -8 degré C</b>	<b>Essai #2 V = 23 m/s; T = -8 degré C</b>	<b>Essai #3 V = 23 m/s; T = -8 degré C</b>
7,25E-08	1,794	1,564	1,962
4,35E-07	1,795	1,868	1,865
8,70E-07	2,276	2,193	1,95
1,30E-06	1,164	1,553	1,56
1,74E-06	1,794	1,564	1,962
4,35E-06	2,144		
8,70E-06	2,51		
3,26E-05	1,963		
7,25E-05	1,92		
7,25E-03	2,073	2,112	2,173
2,17E-04	2,073	2,112	2,173
8,12E-04	2,002		
1,88E-03	2,285	1,971	1,902

TABLE 4 : Résistance à la traction (MPa) en fonction du taux de déformation Ancien montage (d = 40 µm; w = 1,2 g/m3)			
Taux de déformation (1/sec.)	Essai #1 V = 23 m/s; T = -20 degré C	Essai #2 V = 23 m/s; T = -20 degré C	Essai #3 V = 23 m/s; T = -20 degré C
7,25E-08	0,47	0,607	0,506
4,35E-07	0,64	1,785	1,474
8,70E-07	1,651	1,826	1,897
1,30E-06	2,227	2,026	1,907
1,74E-06	2,022	1,911	2,206
4,35E-06	2,269	2,401	2,729
8,70E-06	2,939	2,889	2,586
3,26E-05	2,159	2,49	1,494
7,25E-03	0,364	0,524	0,202
2,17E-04	0,653	1,18	1,731
8,12E-04	1,311	0,95	1,162
1,88E-03	0,475	1,27	0,459
1,88E-02	0,23		

<b>TABLE 5 : Résistance à la traction (MPa) en fonction du taux de déformation Ancien montage (d = 40 µm; w = 1,2 g/m<sup>3</sup>)</b>		
<b>Taux de déformation (1/sec.)</b>	<b>Essai #1 V = 16 m/s; T = -14 degré C</b>	<b>Essai #2 V = 16 m/s; T = -14 degré C</b>
7,20E-08	0,862	
4,34E-07	1,913	1,889
8,69E-07	3,87	2,54
1,70E-06	2,916	2,734
4,35E-06	2,168	2,57
8,69E-06	1,5	2,9
3,30E-05	1,4	1,738
2,17E-04	0,861	0,811
8,11E-04	0,889	0,668
7,25E-03	0,749	0,418

TABLE 6 : Résistance à la traction (MPa) en fonction du taux de déformation Nouveau montage avec coupoles (d = 40 µm; w = 1,2 g/m <sup>3</sup> ; V = 23 m/s; T = -14 degré C)				
Taux de déformation (1/sec.)	Essai #1	Essai #2	Essai #3	Essai #4
2,80E-07	1,31	1,18		
1,47E-06	1,74	1,46	1,47	
3,33E-06	1,94	2,03	1,25	
1,67E-05	0,77	1,14	1,717	1,61
8,30E-04	0,72	1,55		
2,78E-03	1,45			
2,78E-02	1,23	1,1		

TABLE 7 : Résistance à la traction (MPa) en fonction du taux de déformation Nouveau montage sans coupoles (d = 40 µm; w = 1,2 g/m <sup>3</sup> ; V = 23 m/s; T = -14 degré C)					
Taux de déformation (1/sec.)	Essai #1	Essai #2	Essai #3	Moyenne	Ecart type
8,33E-08	0,515			0,52	0,00
4,16E-07	1,01	1,05		1,03	0,03
5,00E-06	1,636	1,52	2,05	1,74	0,28
2,50E-06	1,6	2,48	1,54	1,87	0,53
2,50E-05	1,84	2,01	1,79	1,88	0,12
1,88E-04	2,12	1,65	2,06	1,94	0,26
1,25E-03	1,35	0,768	0,65	0,92	0,37
4,20E-02	0,829	1,1	0,772	0,90	0,18

TABLE 8 : Résistance à la traction (MPa) en fonction du taux de déformation Nouveau montage sans coupoles (d = 40 µm; w = 1,2 g/m <sup>3</sup> )			
Taux de déformation (1/sec.)	Conditions #1 V = 23 m/s; T = -20 degré C	Conditions #2 V = 23 m/s; T = -8 degré C	Conditions #3 V = 16 m/s; T = -14 degré C
8,33E-08	0,126	0,265	0,265
5,00E-06	0,826	0,865	0,69
4,17E-02	0,611	0,454	0,529

## **ANNEXE 2**

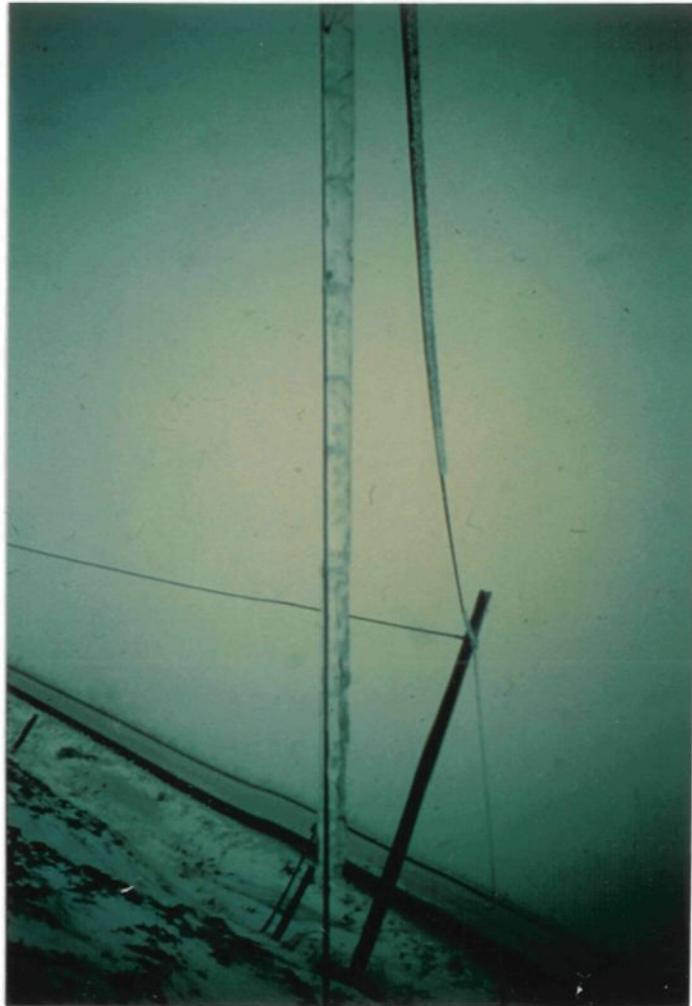


Figure 1: Observation de verglas sur des câbles à La Pocatière.



Figure 2: Observation de givre léger à la station de mesure expérimentale du Mont Valin sur un faisceau de câbles, un câble Bersimis, un câble de garde et différents types d'isolateurs.

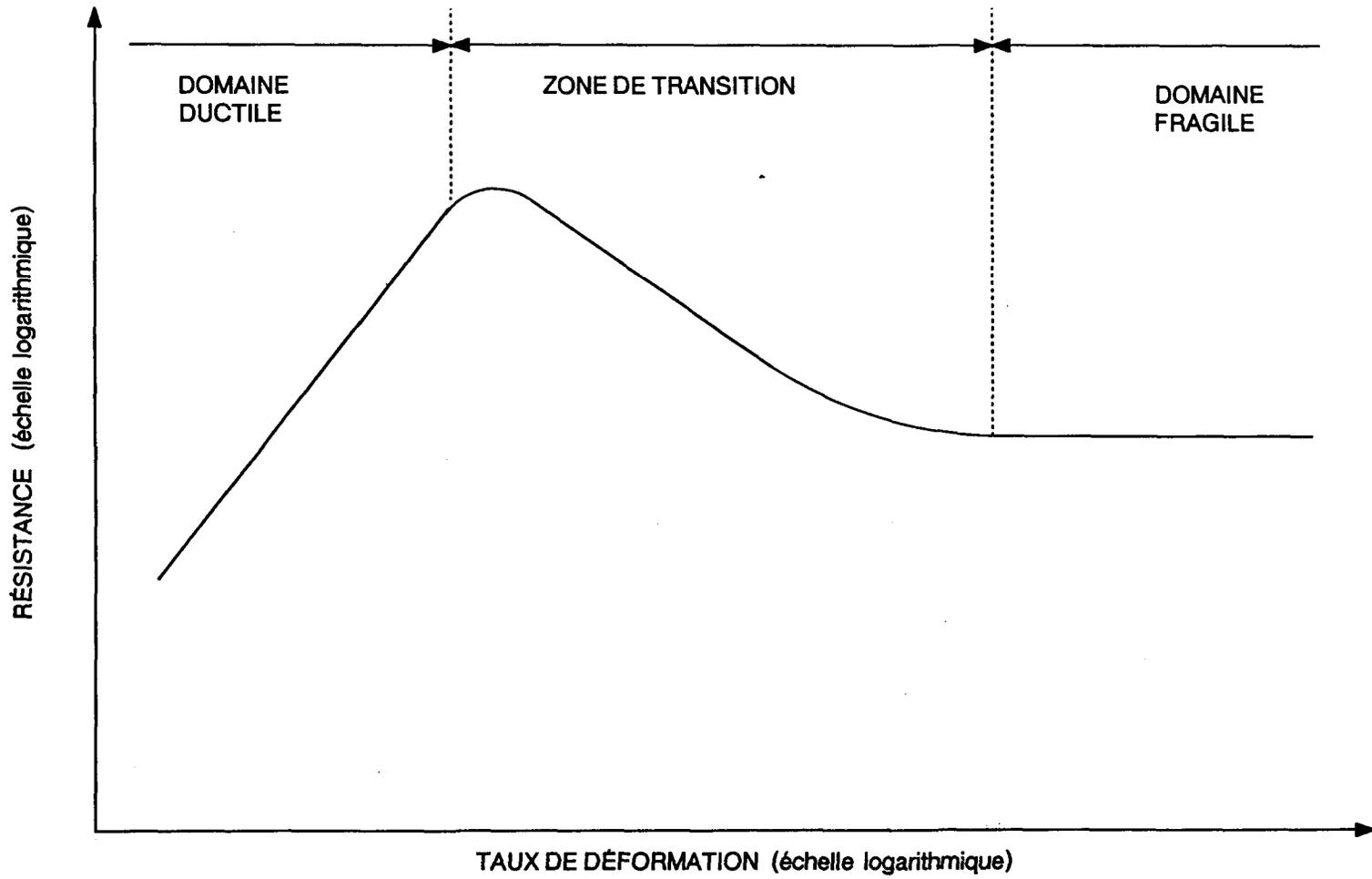


Figure 3 : Allure théorique des courbes de résistance (flexion, torsion, traction, compression) en fonction du taux de déformation

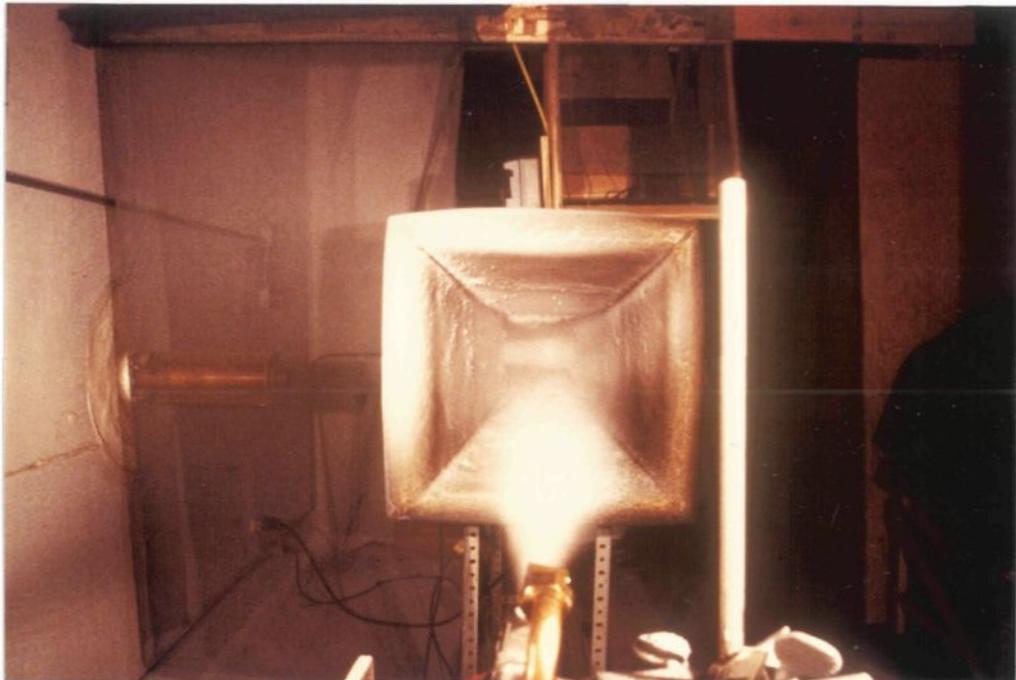


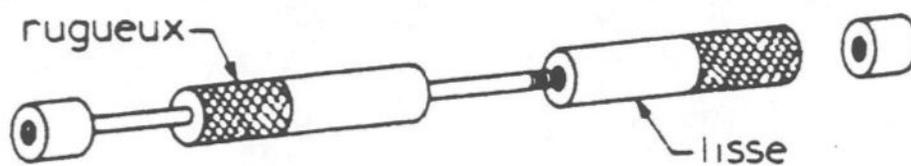
Figure 4: Vue du gicleur alimenté en air et en eau pour reproduire les conditions atmosphériques.



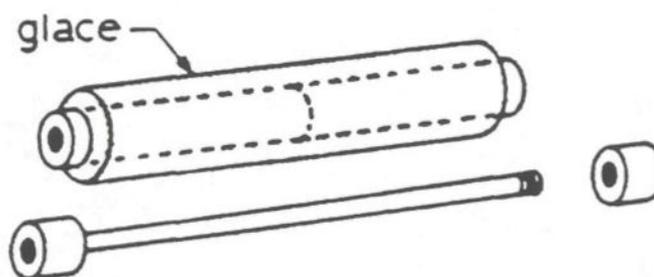
Figure 5: Vue des servo-mécanismes permettant l'ajustement des pressions d'alimentation du gicleur.



Figure 6: Vue du micro-ordinateur permettant de contrôler l'ouverture des servo-valves.



(a) SANS GLACE



(b) AVEC GLACE

Figure 7: Premier montage de traction réalisé par le G.R.I.E.A.

ECHANTILLON EN TRACTION

ECHANTILLON DE COMPENSATION

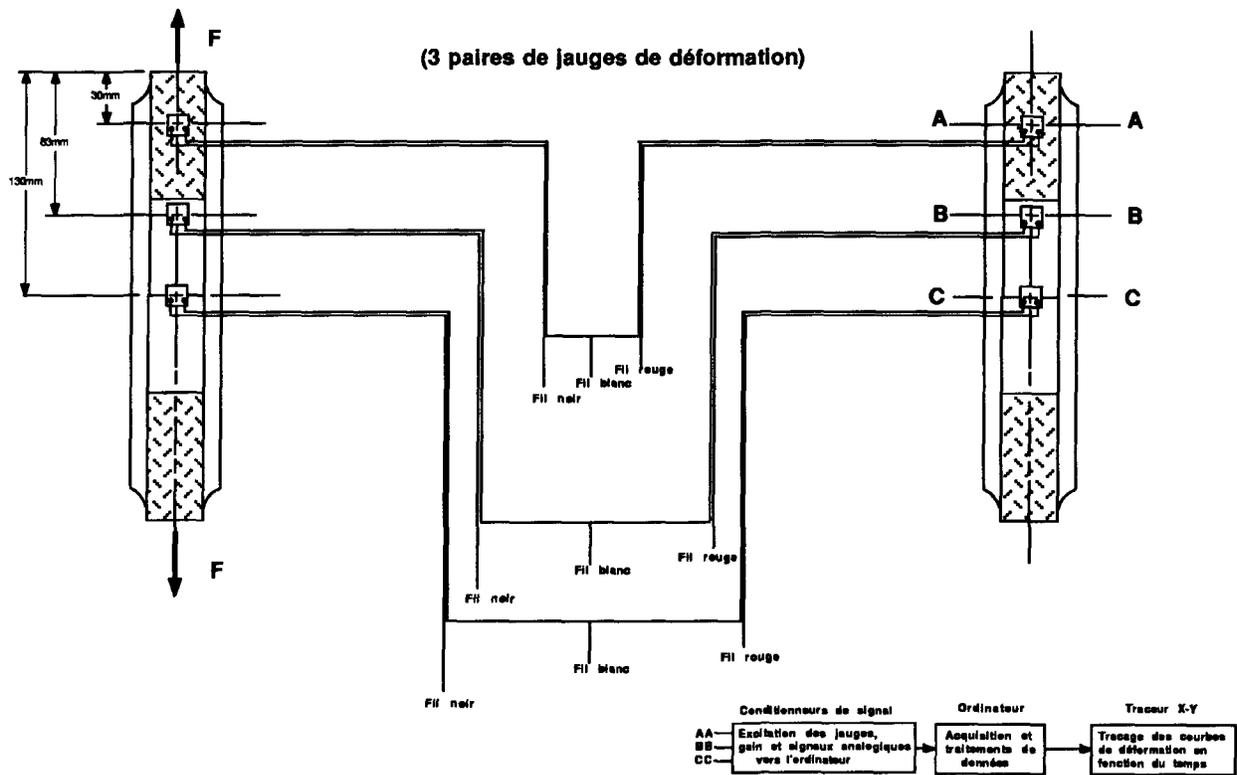
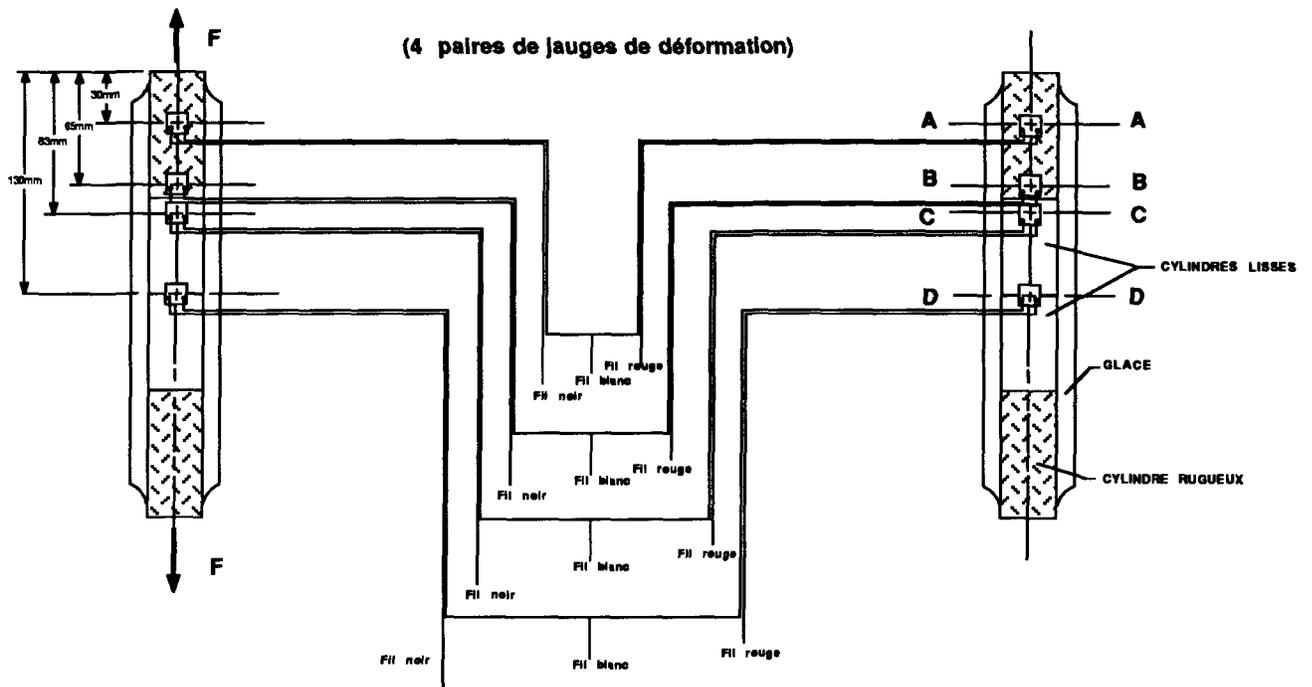
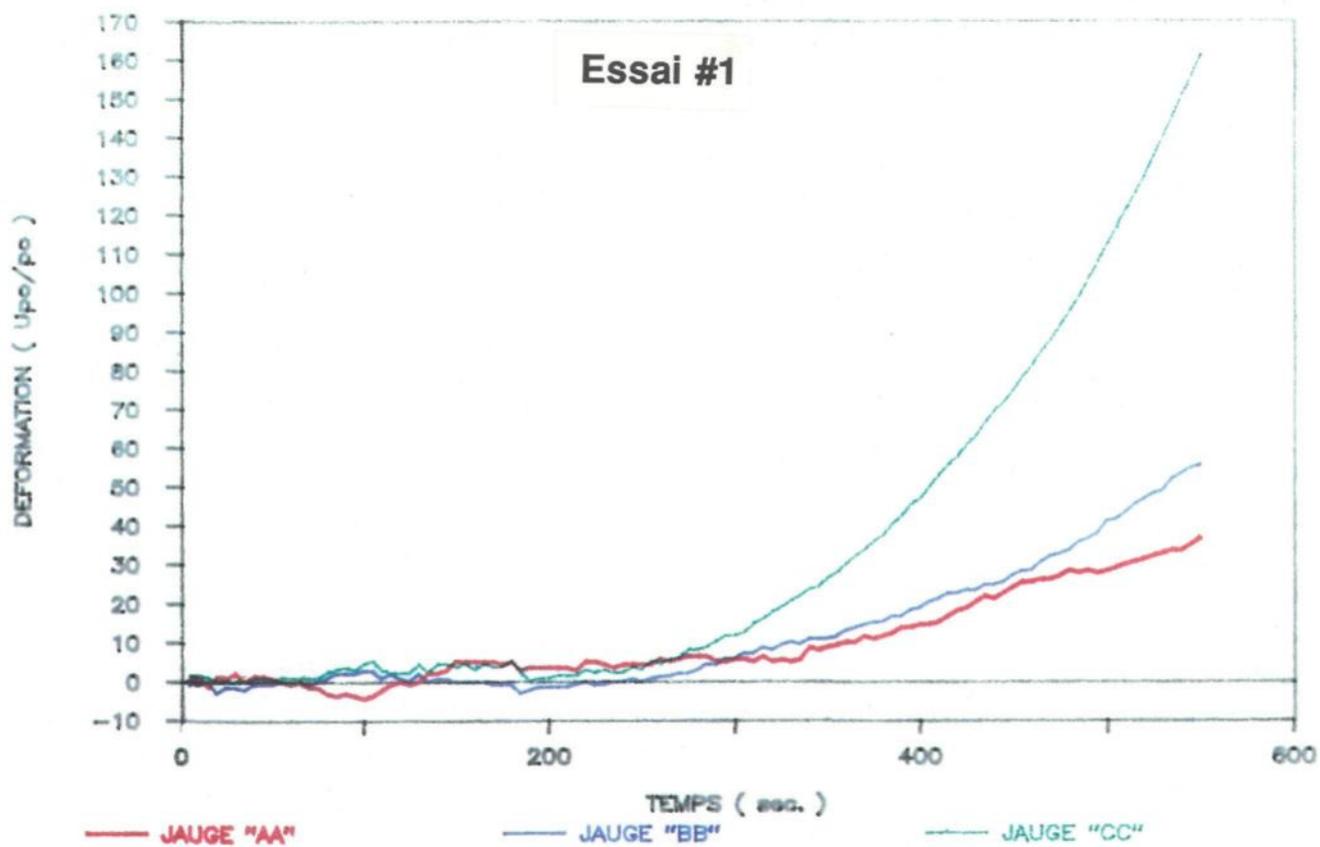
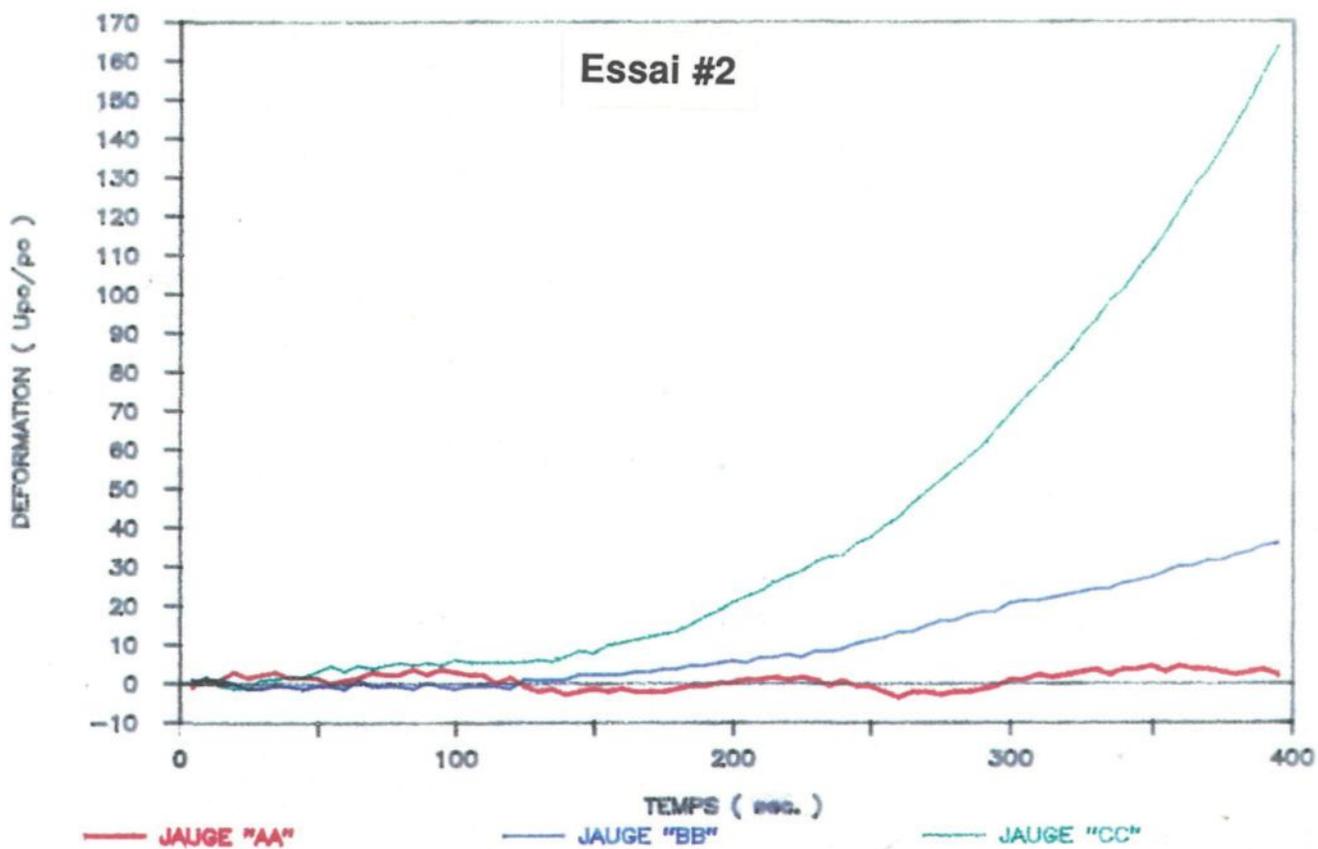


Figure 8 : Schéma représentant l'installation de jauges de déformation sur l'ancien montage

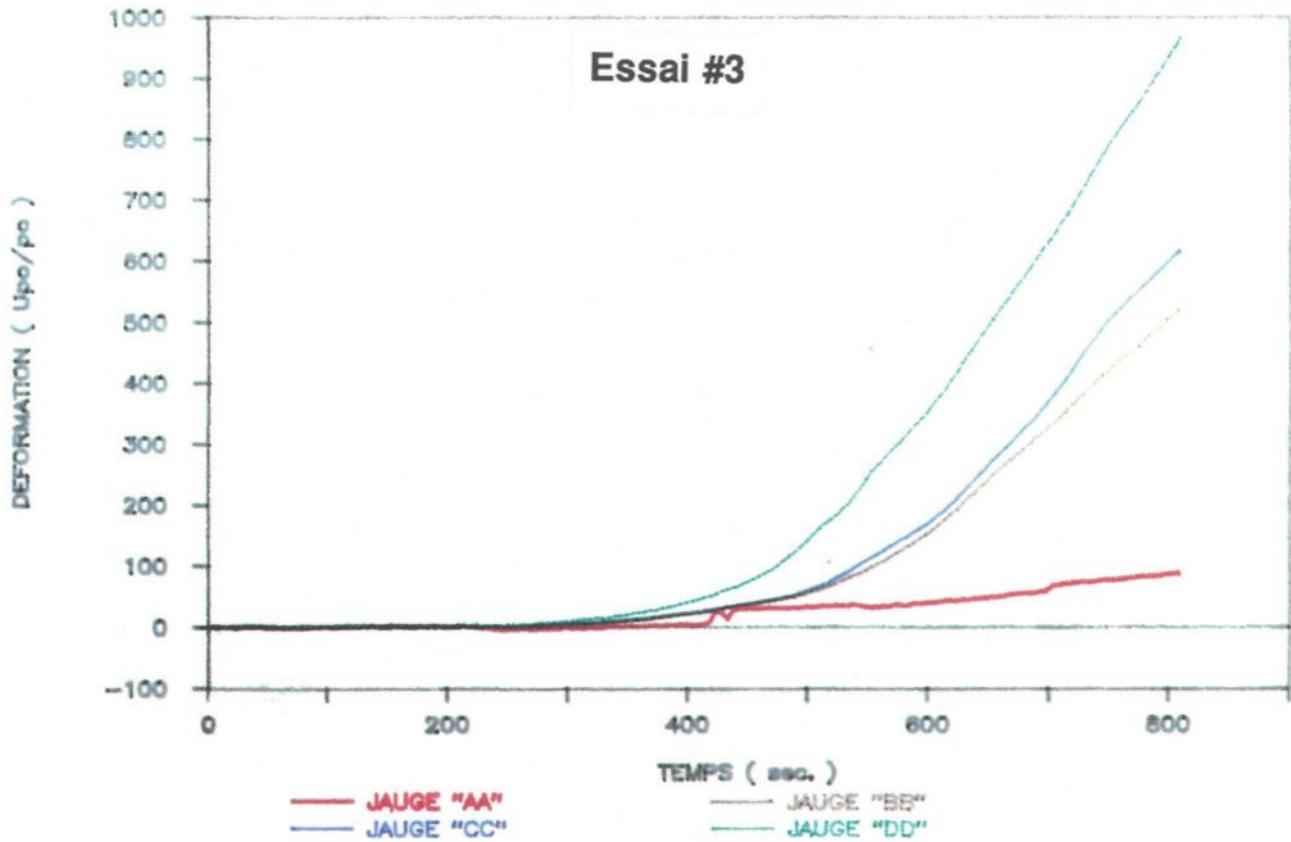
### DEFORMATION EN FONCTION DU TEMPS



### DEFORMATION EN FONCTION DU TEMPS



## DEFORMATION EN FONCTION DU TEMPS



## DEFORMATION EN FONCTION DU TEMPS

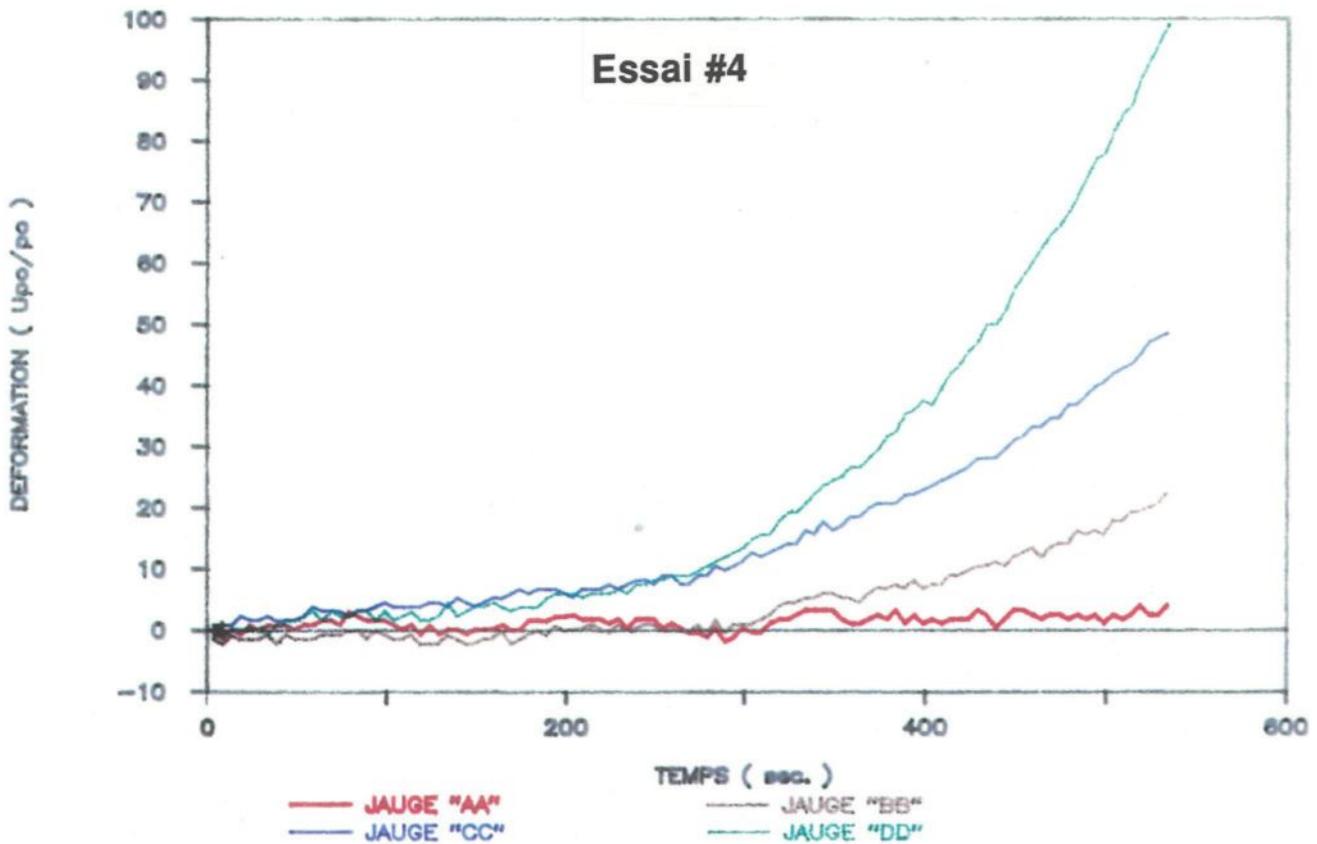


FIGURE 10

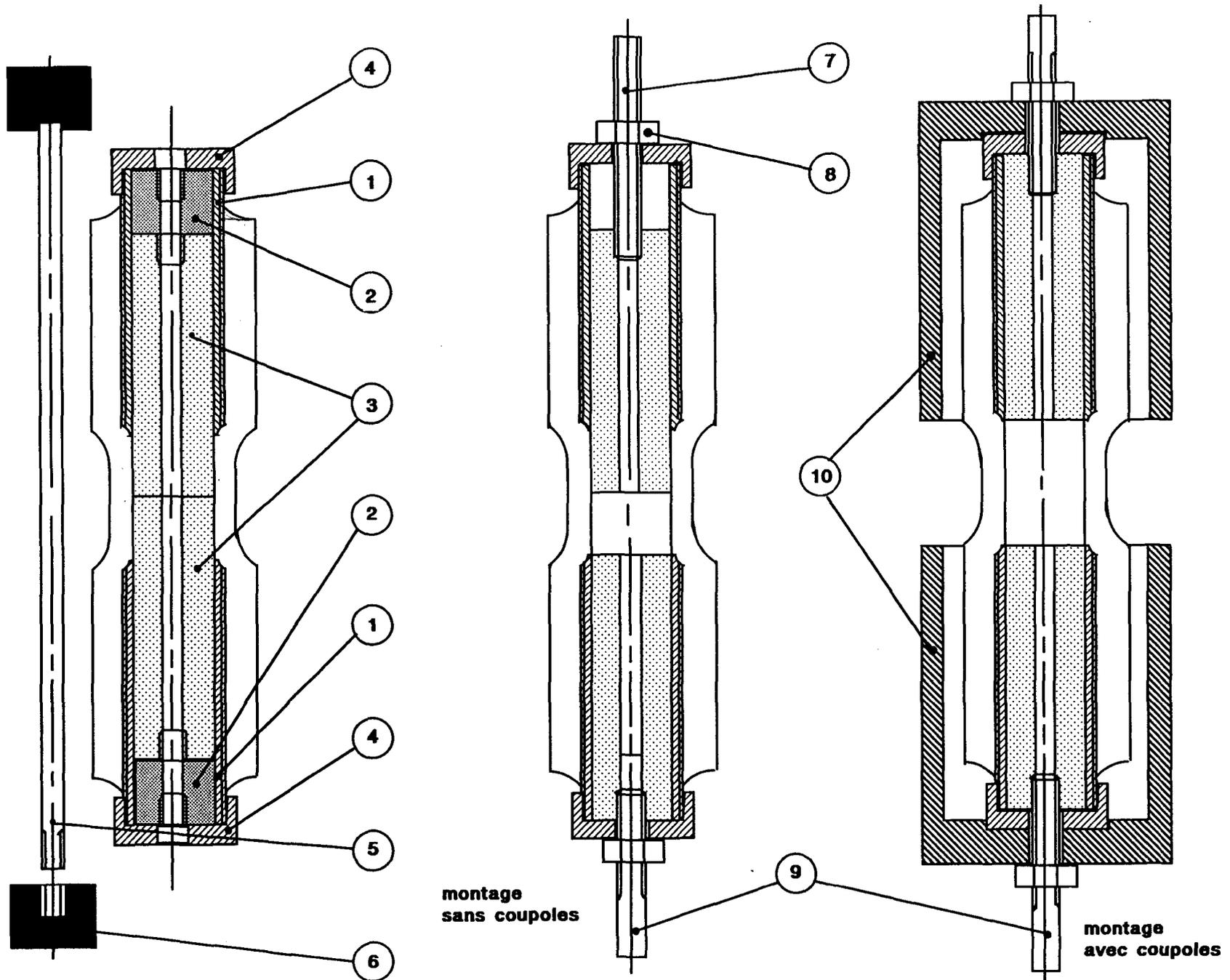


Figure 11 : Vue schématique des pièces composant le nouveau montage avec et sans coupoles

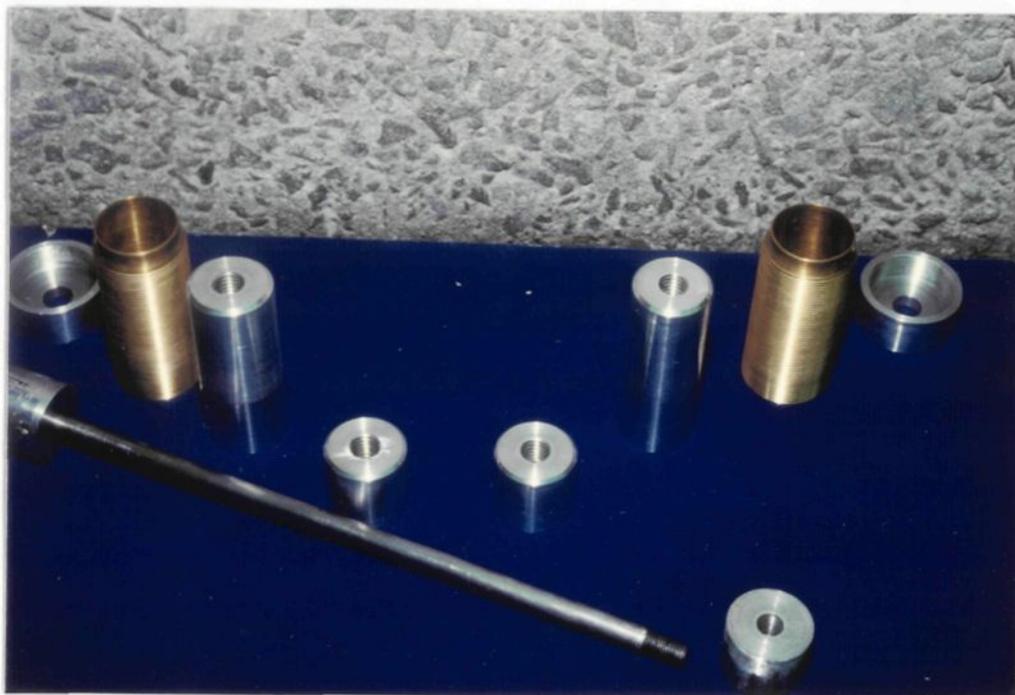


Figure 12: Vue des pièces composant le nouveau montage.



Figure 13: Vue de l'assemblage des capuchons filetés sur les douilles de laiton.

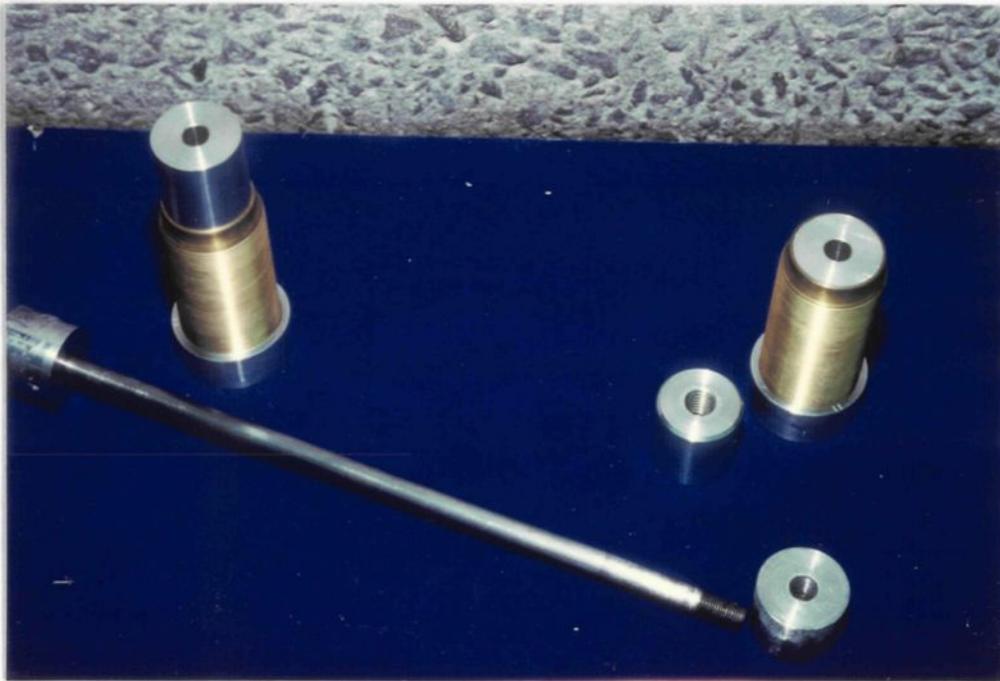


Figure 14: Vue de l'assemblage des deux moitiés du cylindre de mesure; à droite, demi-montage sans la petite douille filetée pour mesurer la résistance et la déformation; à gauche, demi-montage avec la petite douille filetée pour l'accumulation de glace.

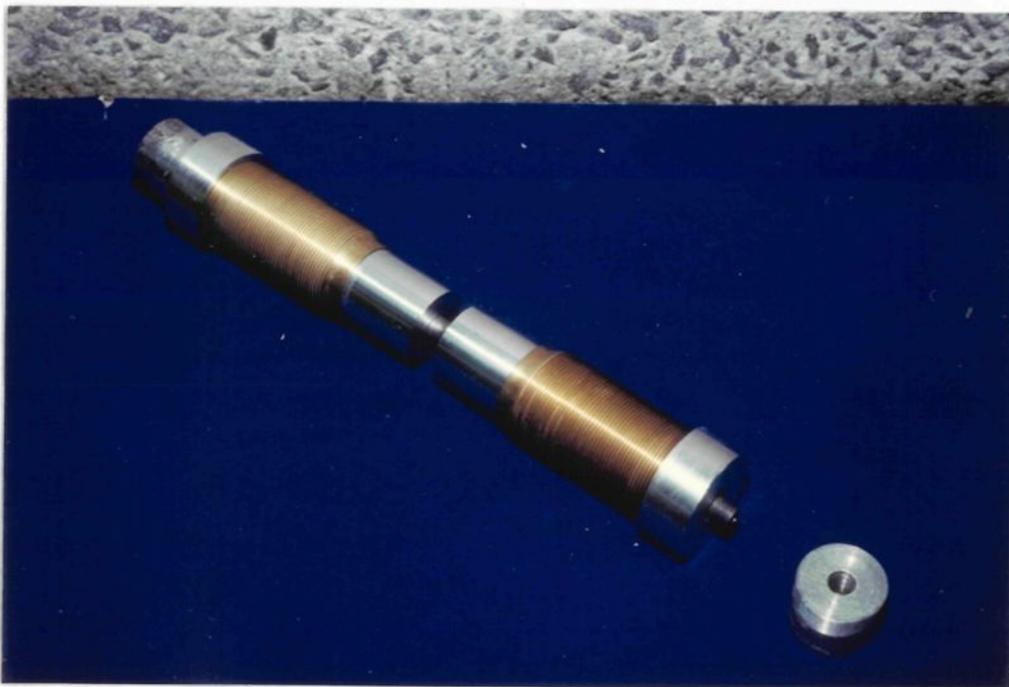


Figure 15: Vue de l'assemblage du cylindre pour l'accumulation de glace.

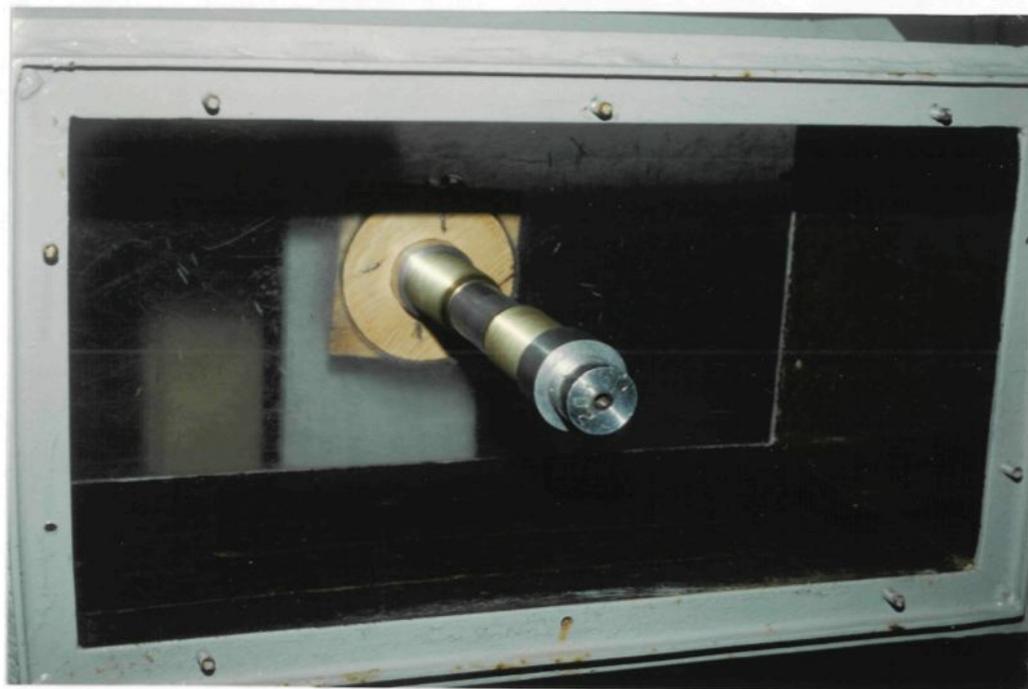


Figure 16: Section d'essai de la soufflerie avec cylindre expérimental.

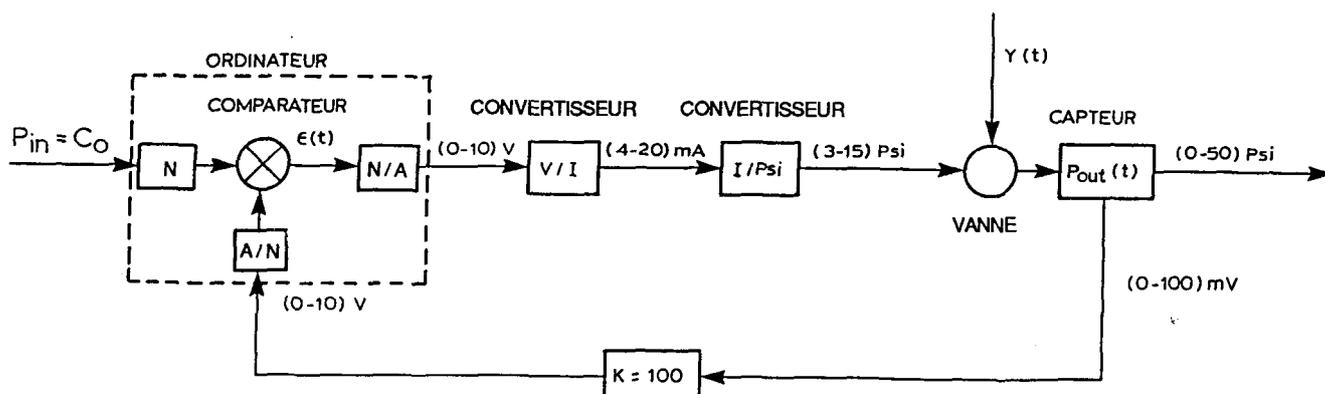


Figure 17: Schéma fonctionnel du système de commande des pressions d'alimentation en air et en eau.

## ORGANIGRAMME DU PROGRAMME DE CONTROLE

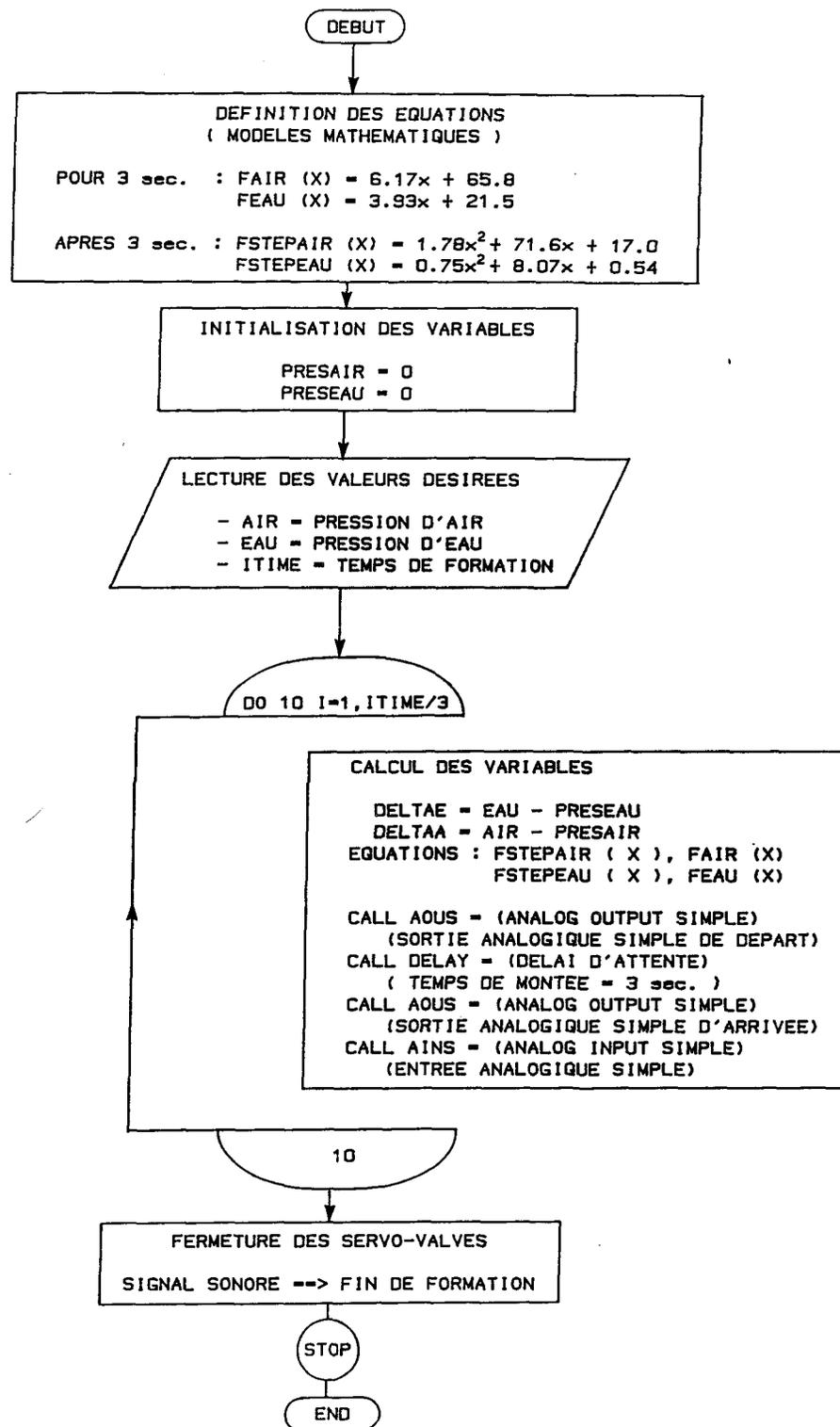


Figure 18: Organigramme représentant le programme de contrôle des pressions d'alimentation en air et en eau du gicleur.

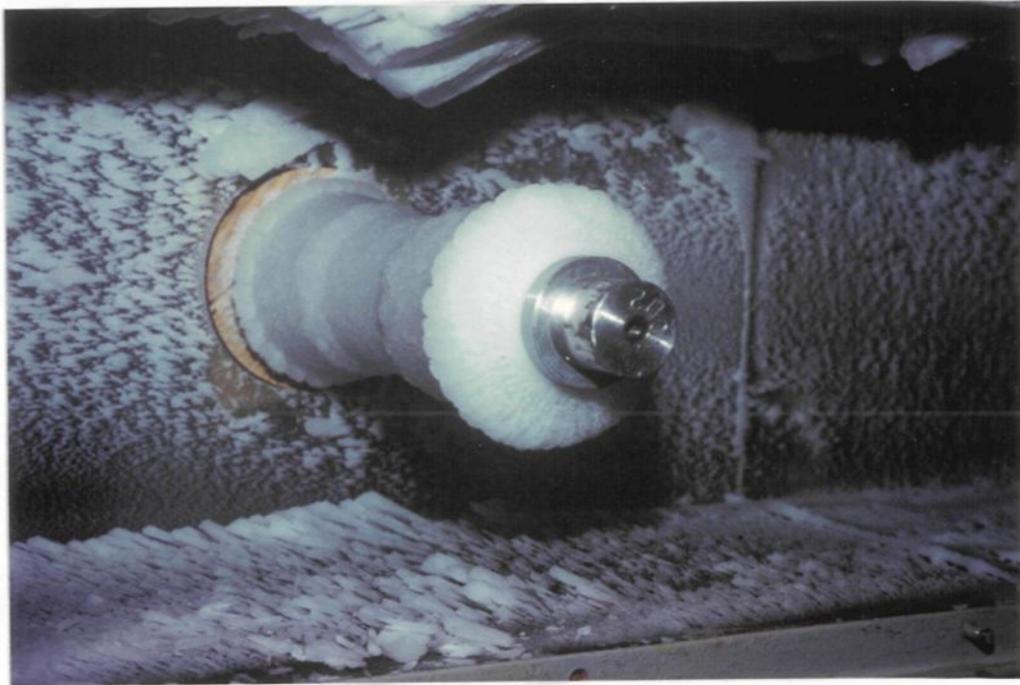


Figure 19: Cylindre expérimental avec accumulation de glace atmosphérique.

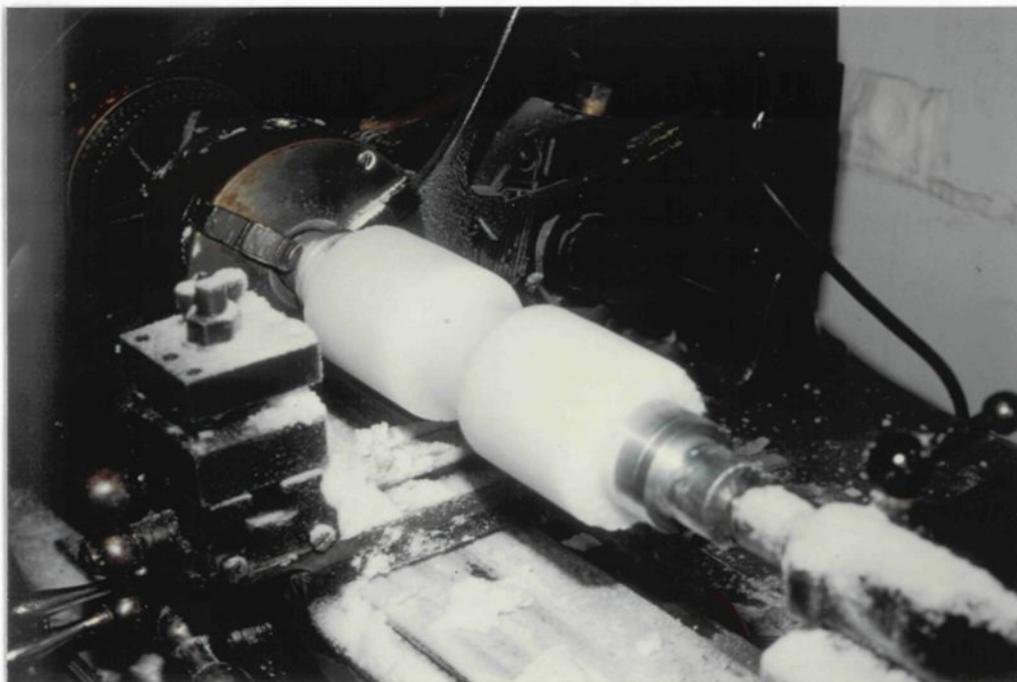


Figure 20: Usinage du manchon de glace atmosphérique.

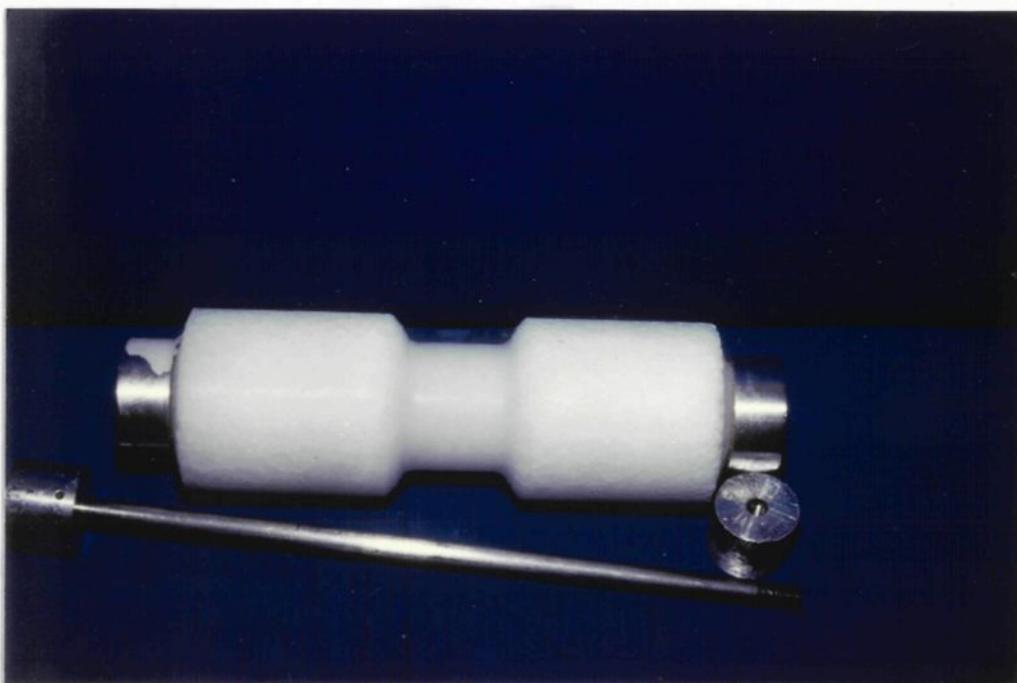


Figure 21: Vue du cylindre expérimental, sans la tige d'assemblage.



Figure 22: Vue du cylindre sans une des petites douilles d'aluminium.

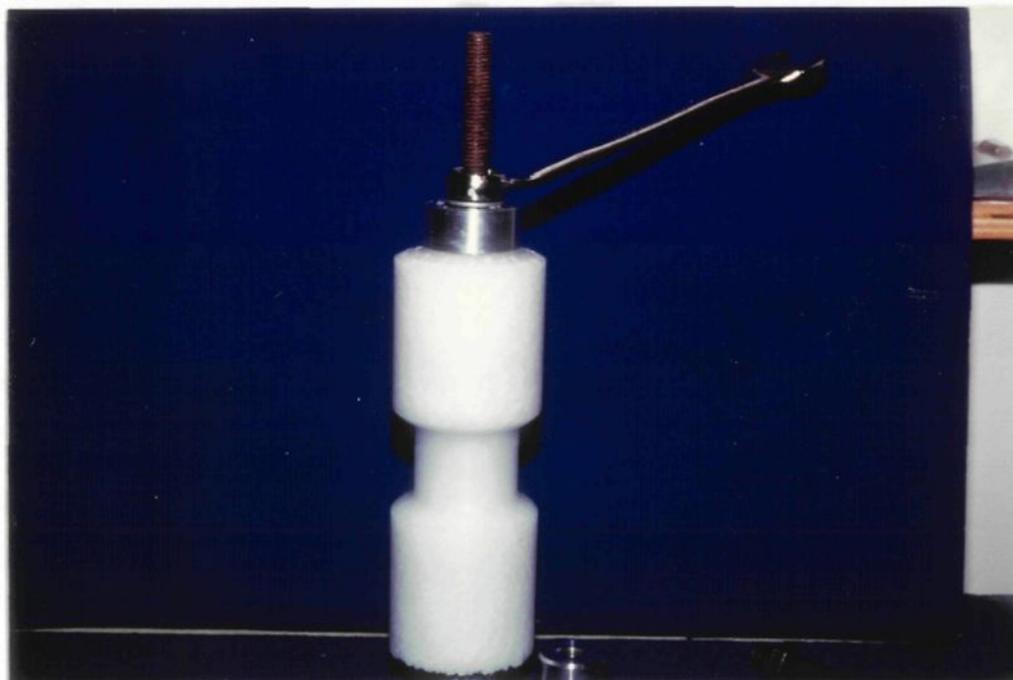


Figure 23: Vue du mécanisme permettant de retirer les douilles centrales (tige filetée, écrou et clé).

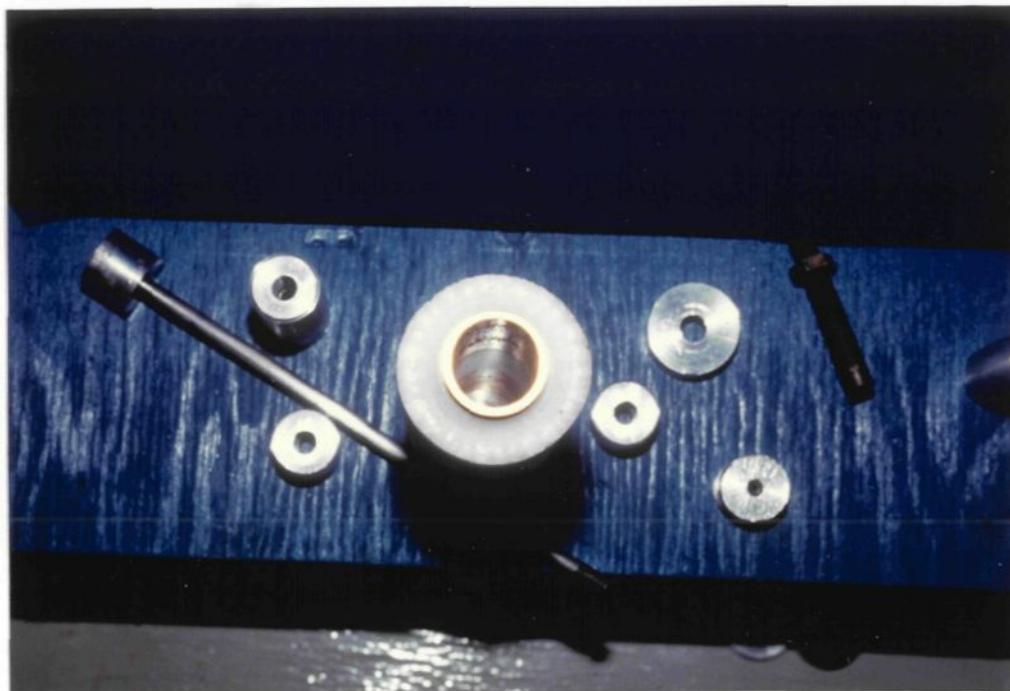


Figure 24 Vue de dessus d'un manchon de glace atmosphérique sans les douilles centrales.



Figure 25: Vue de coté d'un manchon de glace atmosphérique sans les douilles centrales.



Figure 26: Presse mécanique ATS (Applied Test Systems).

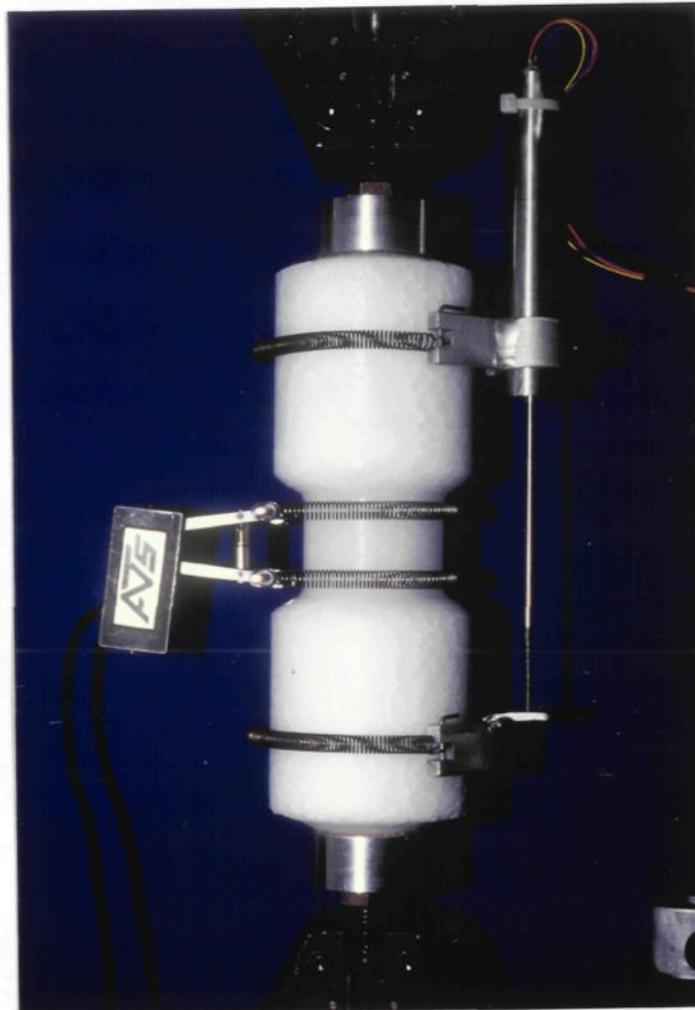


Figure 27: Montage expérimental comprenant le manchon de glace, un capteur de déplacement à induction (LVDT) et un extensomètre.

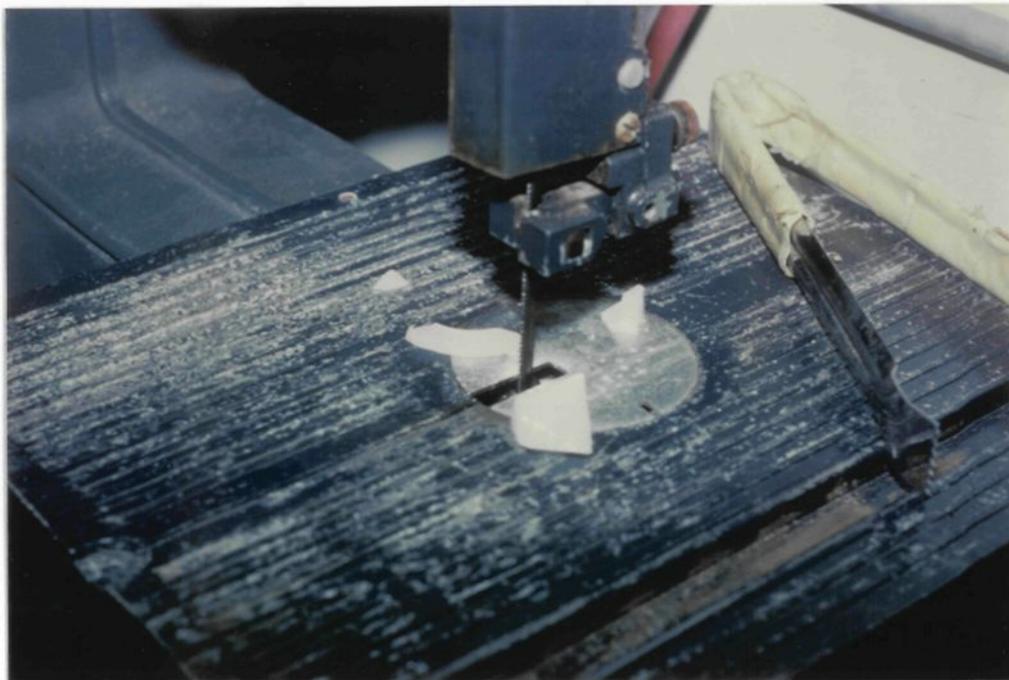


Figure 28: Taillage de morceaux de glace atmosphérique pour la mesure de la densité.



Figure 29: Montage de mesure de la densité par le principe d'Archimède.

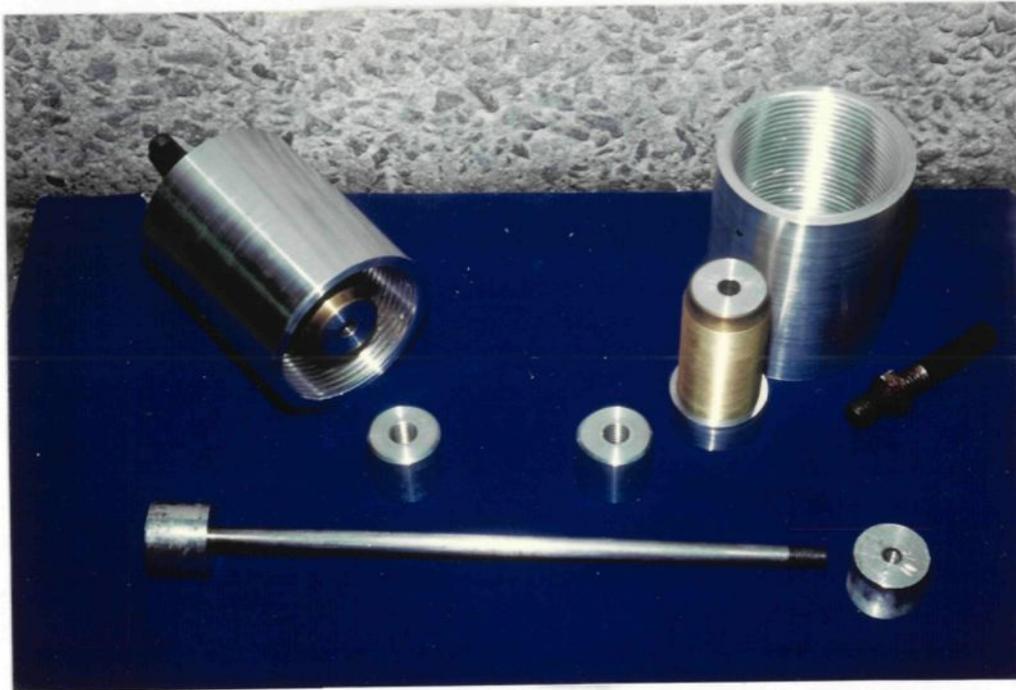


Figure 30: Vue des pièces du cylindre expérimental avec coupes.

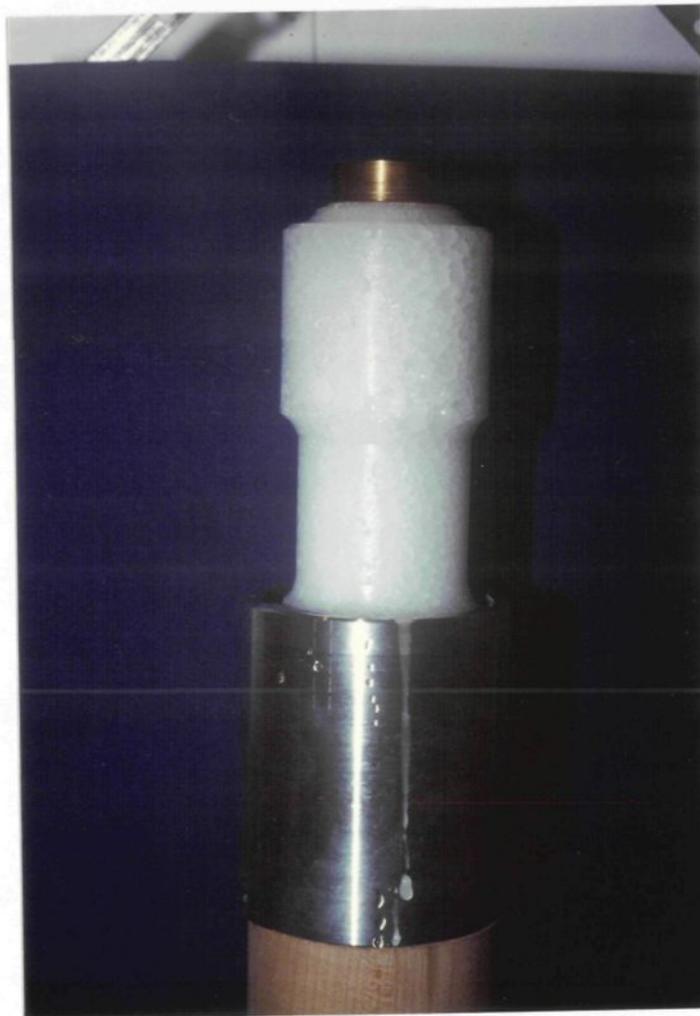


Figure 31: Ajout d'eau froide à l'interface coupole et glace.

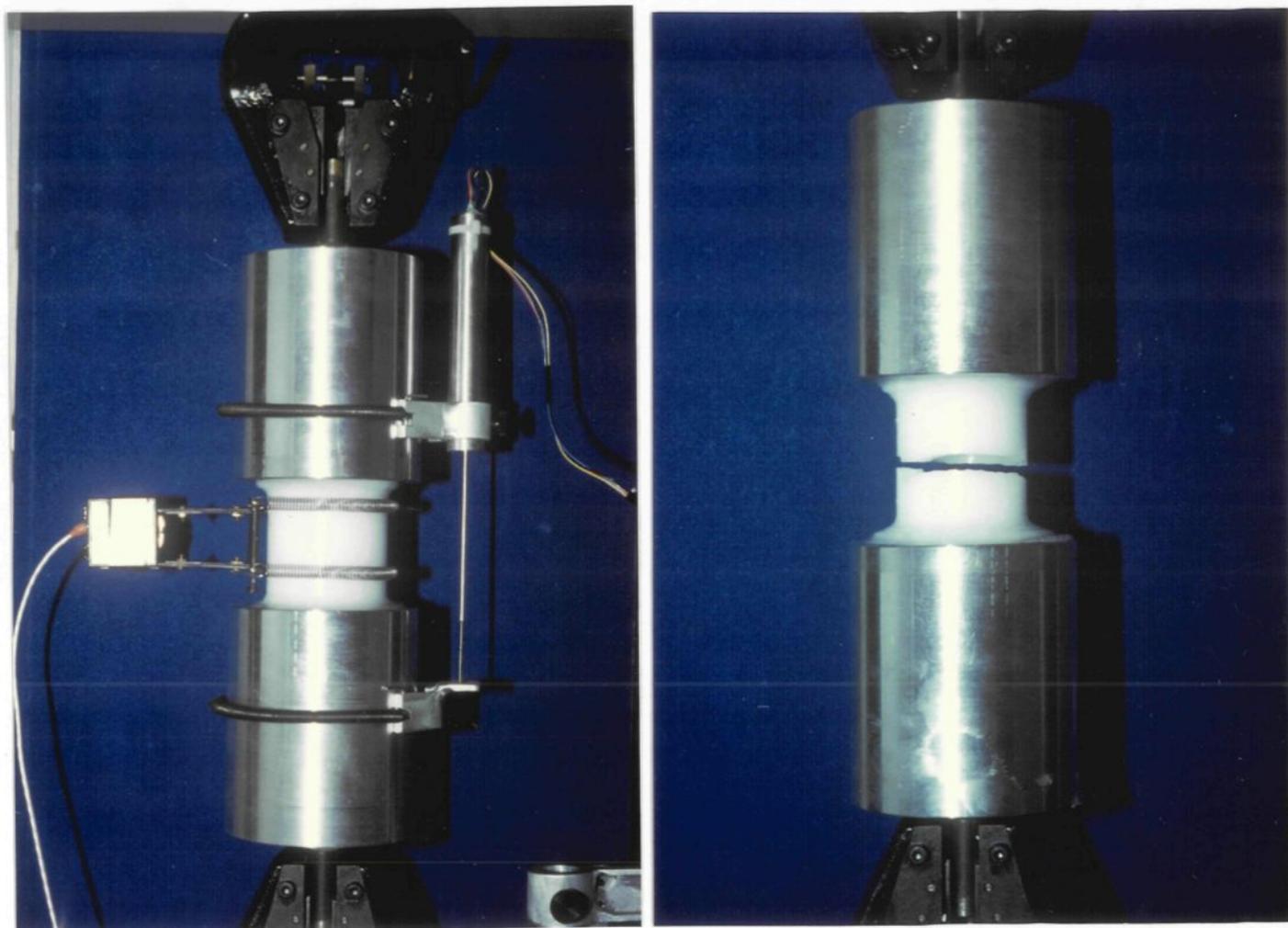


Figure 32: Essai de traction sur cylindre expérimental avec coupoles.

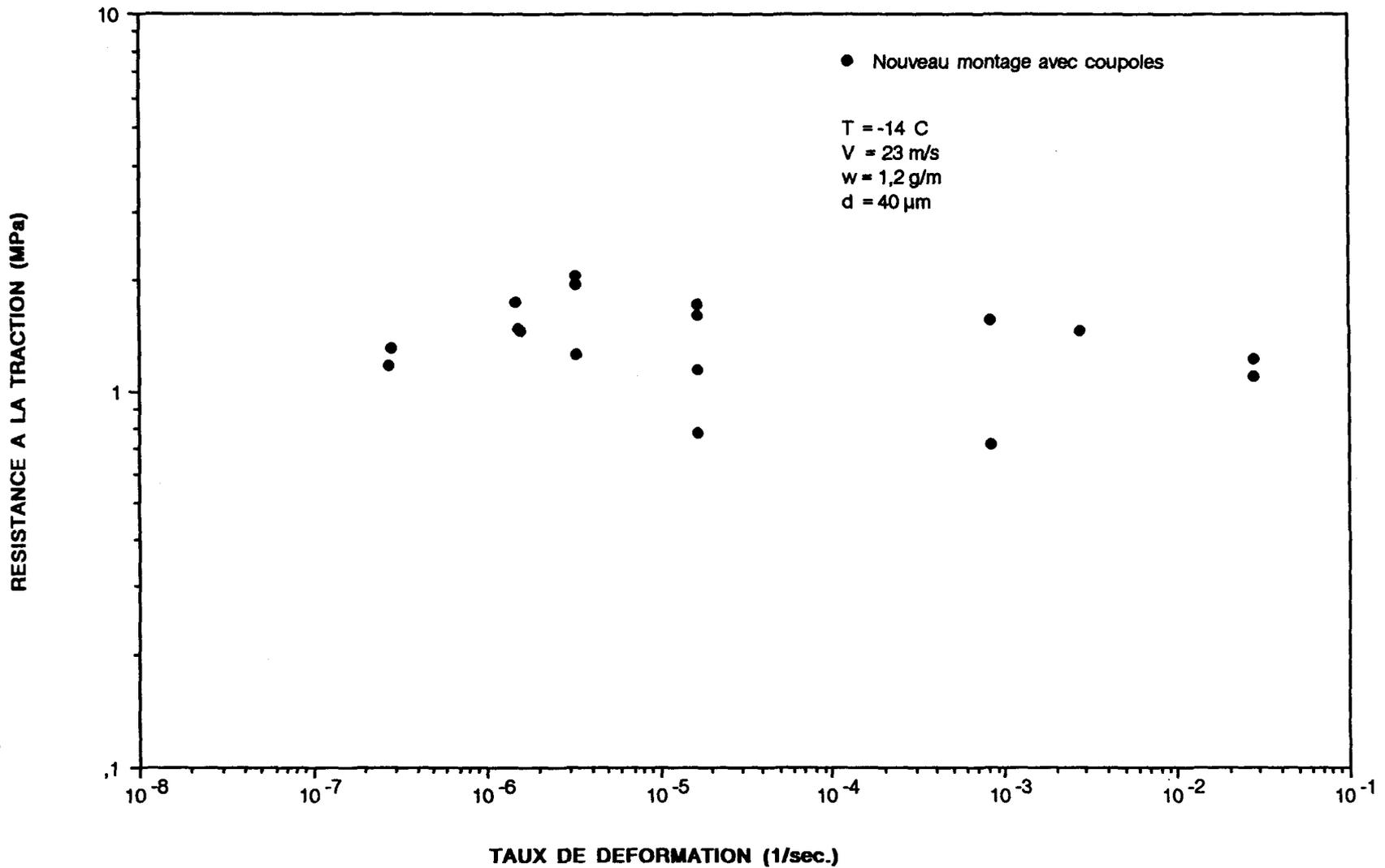


Figure 33: Résistance à la traction en fonction du taux de déformation (nouveau montage avec coupoles, essais préliminaires)

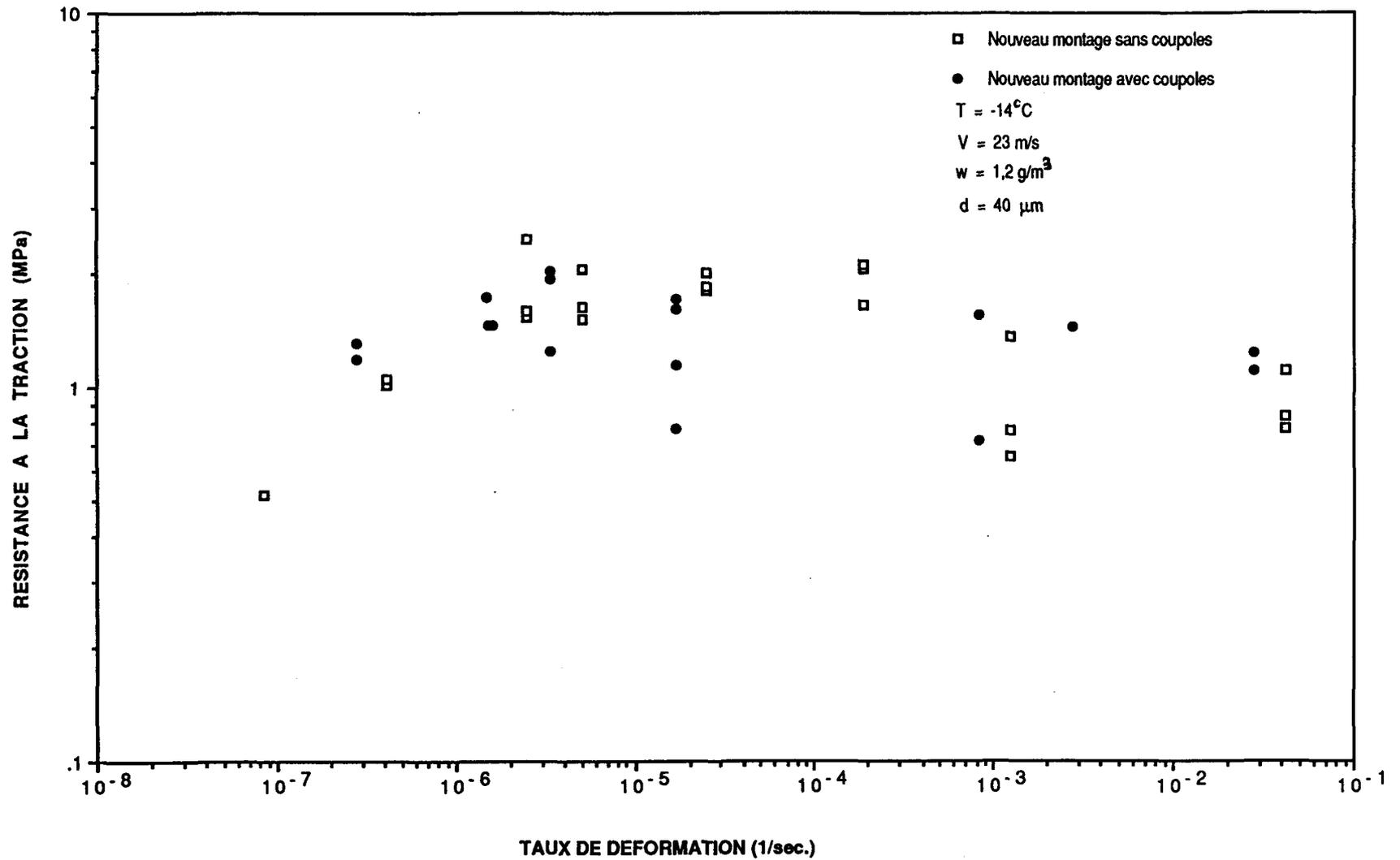


Figure 34: Résistance à la traction en fonction du taux de déformation (comparaison nouveau montage avec coupoles et sans coupoles, essais préliminaires)

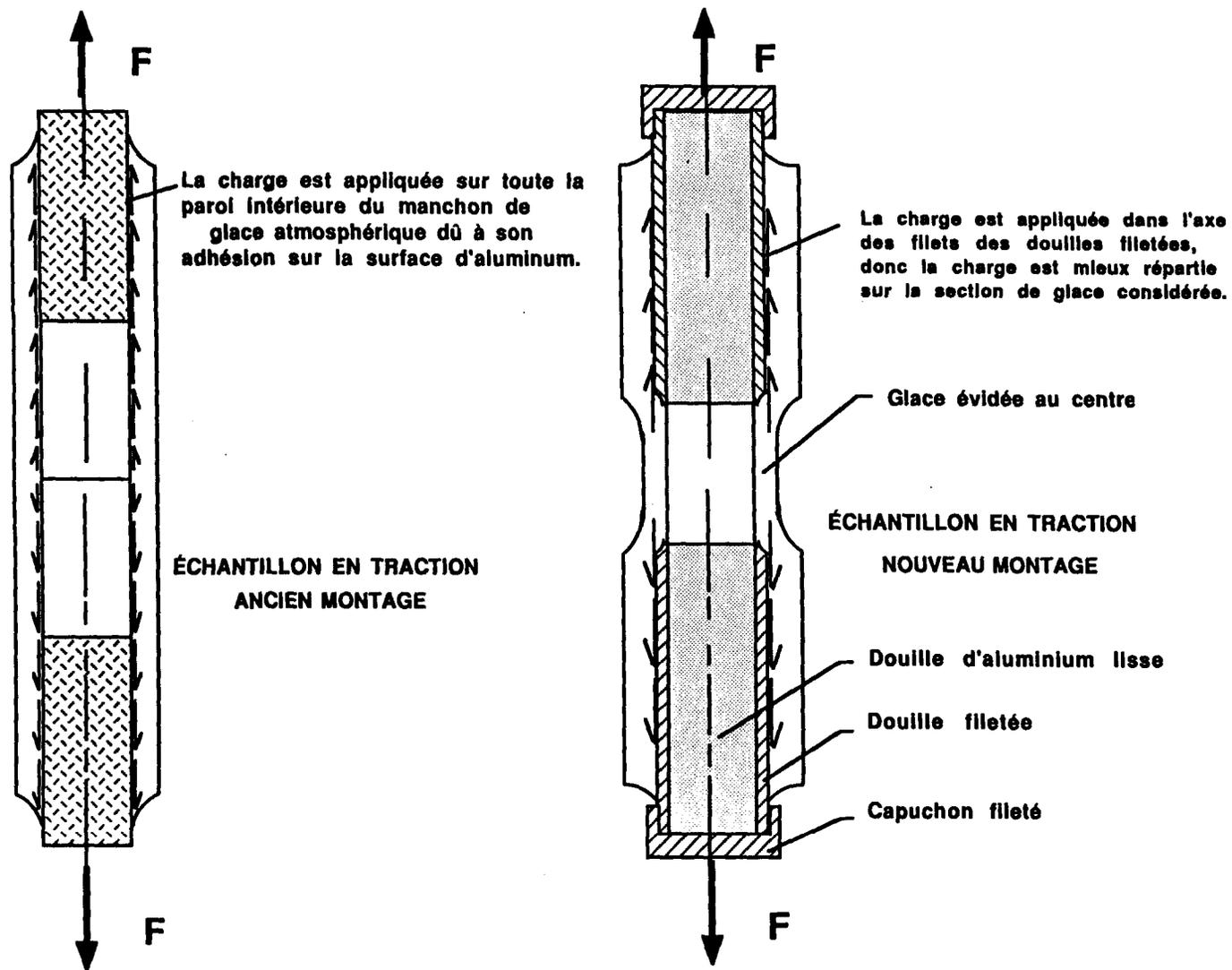


Figure 35 : Vue schématique de l'application des charges pour le nouveau montage et l'ancien montage

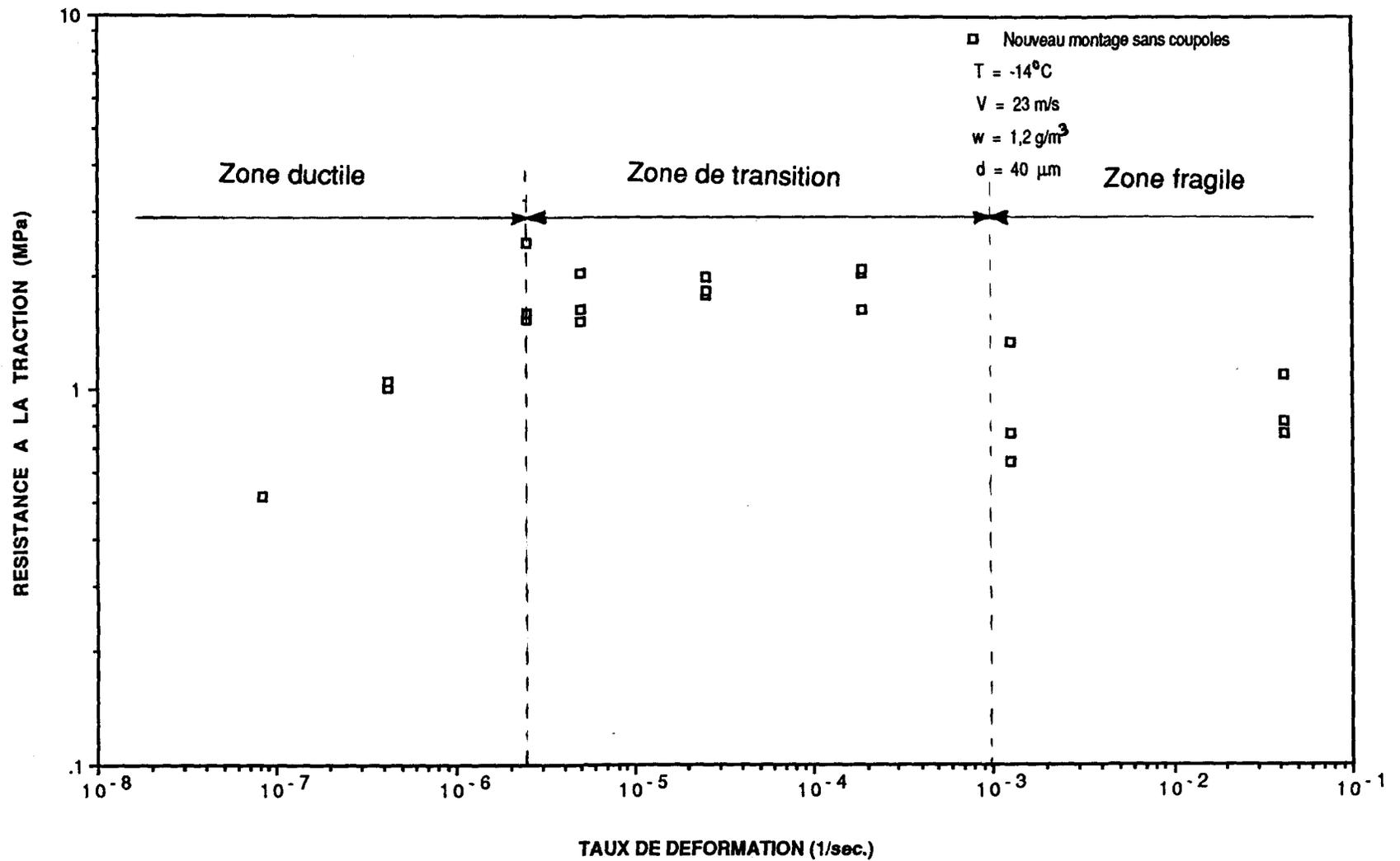


Figure 36: Résistance à la traction en fonction du taux de déformation (nouveau montage sans coupes)

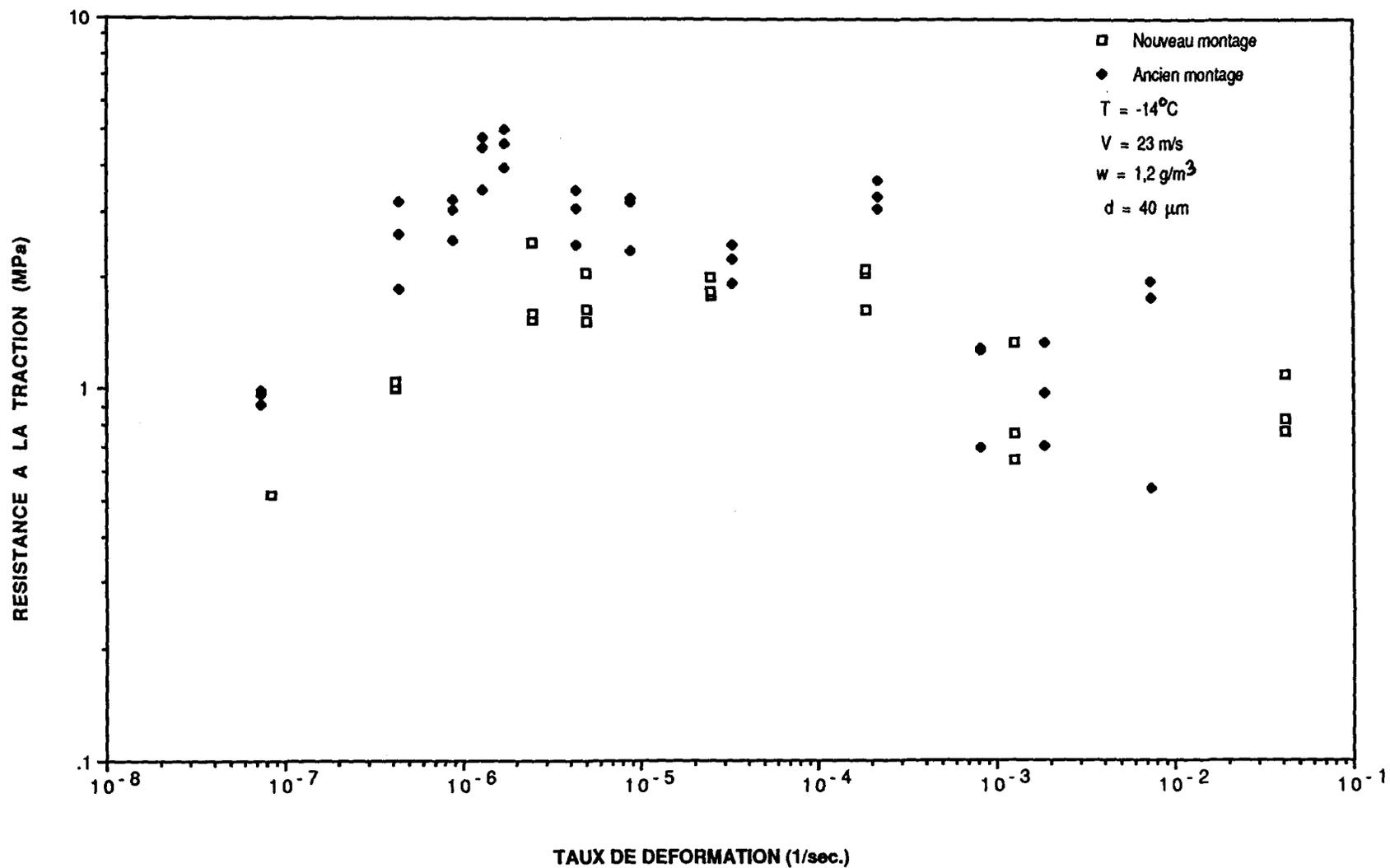


Figure 37: Comparaison des résultats du nouveau montage avec ceux de l'ancien montage pour les essais de traction (T= -14°C; v = 23 m/s; w = 1,2 g/m<sup>3</sup>; d = 40 μm). Résistance à la traction en fonction du taux de déformation.

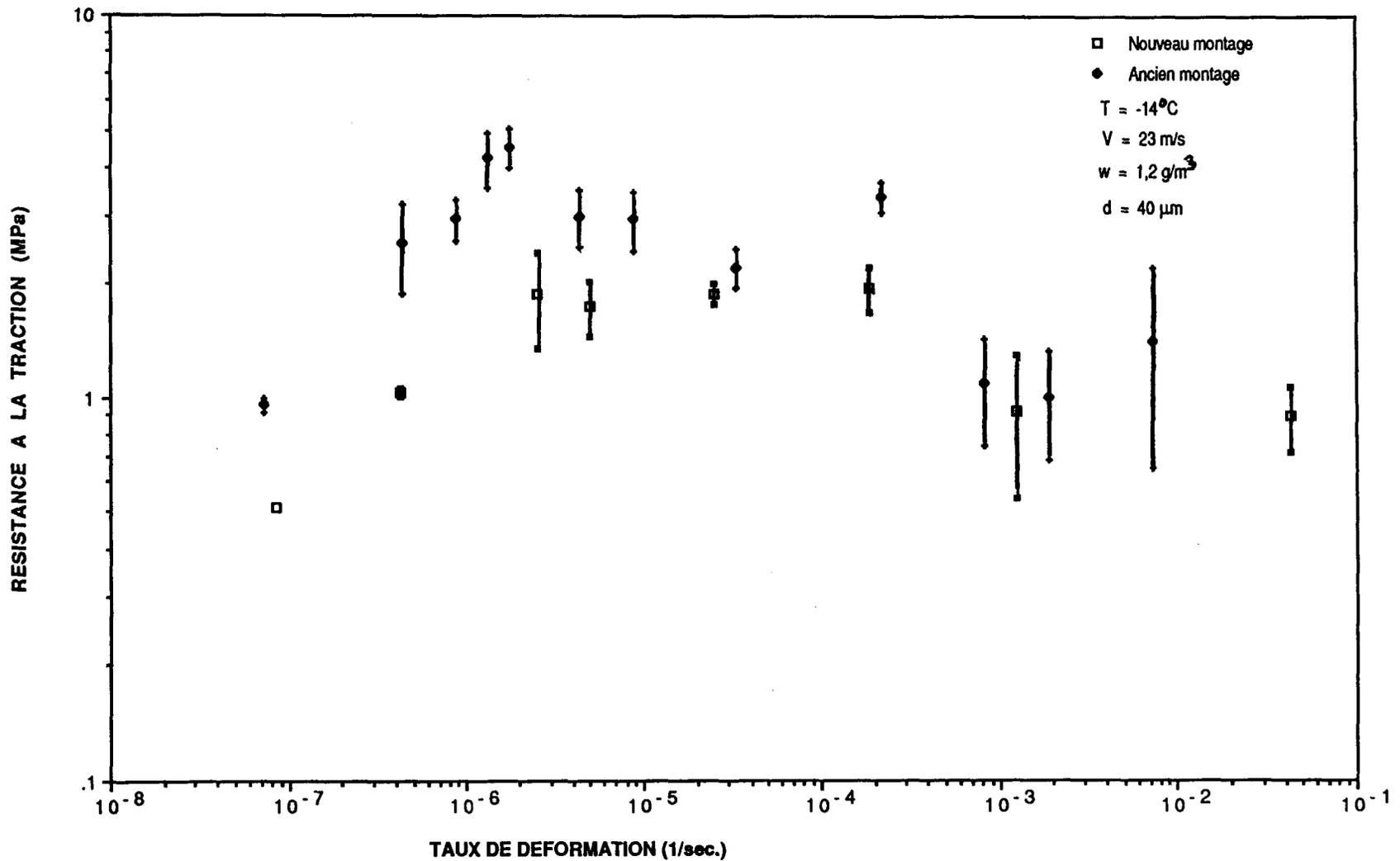


Figure 38: Comparaison entre les écart types du nouveau montage et ceux de l'ancien montage pour les essais de traction (T = -14°C; v = 23 m/s; w = 1,2 g/m<sup>3</sup>; d = 40 μm). Résistance à la traction en fonction du taux de déformation.

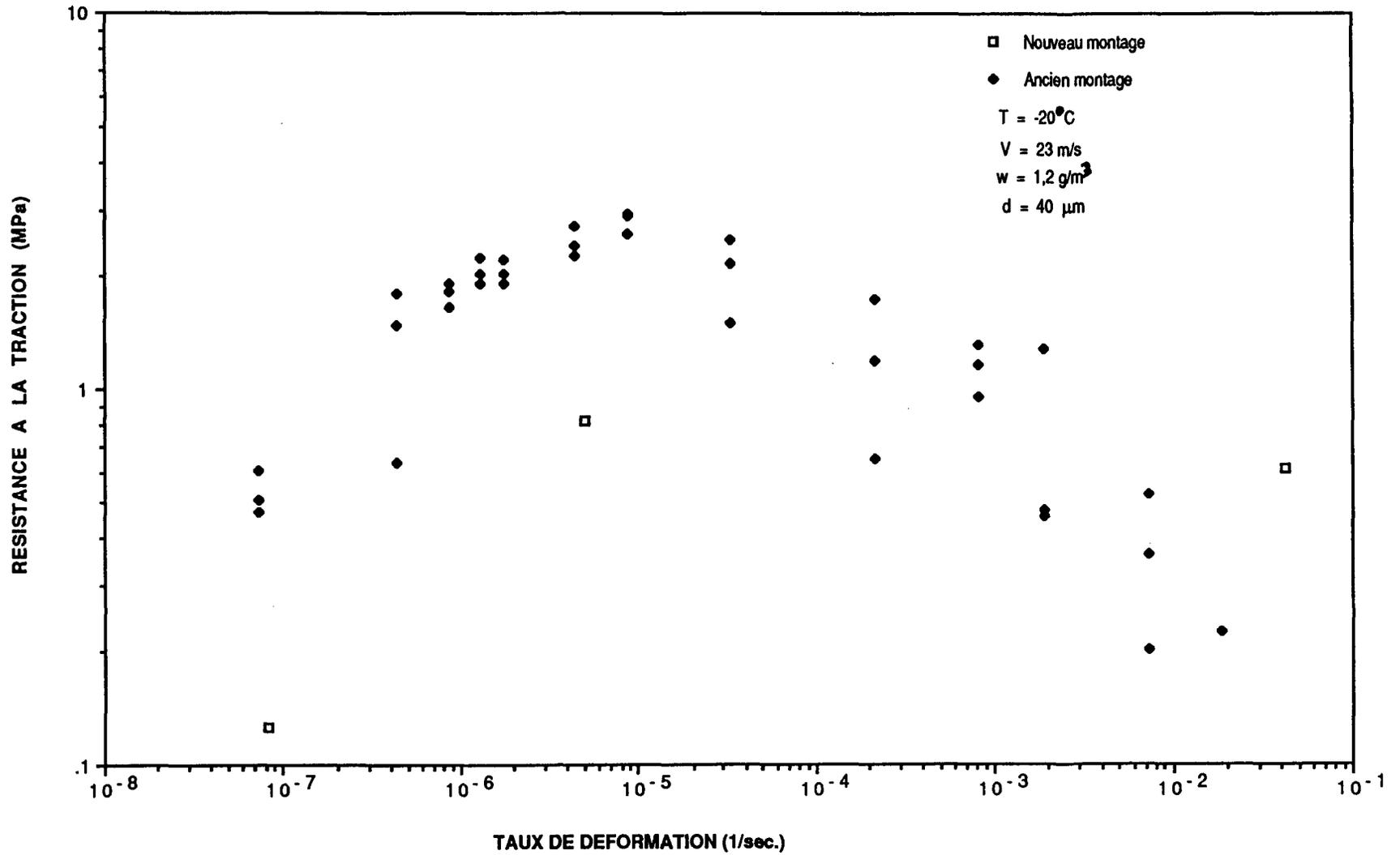


Figure 39: Comparaison des résultats du nouveau montage avec ceux de l'ancien montage pour les essais de traction (T= -20°C; v = 23 m/s; w = 1,2 g/m<sup>3</sup>; d = 40 μm). Résistance à la traction en fonction du taux de déformation.

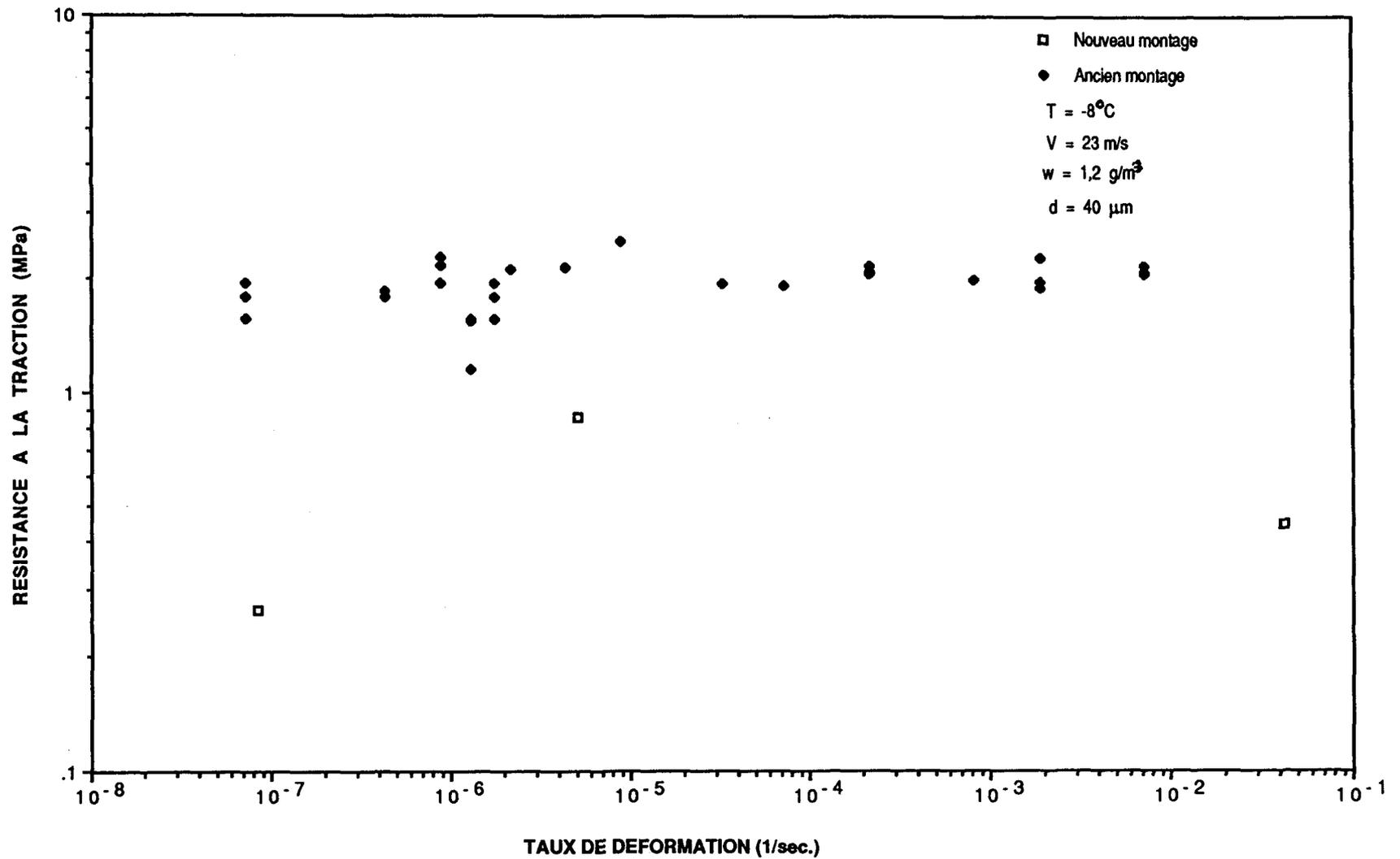


Figure 40: Comparaison des résultats du nouveau montage avec ceux de l'ancien montage pour les essais de traction ( $T = -8^{\circ}\text{C}$ ;  $v = 23 \text{ m/s}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $d = 40 \mu\text{m}$ ). Résistance à la traction en fonction du taux de déformation.

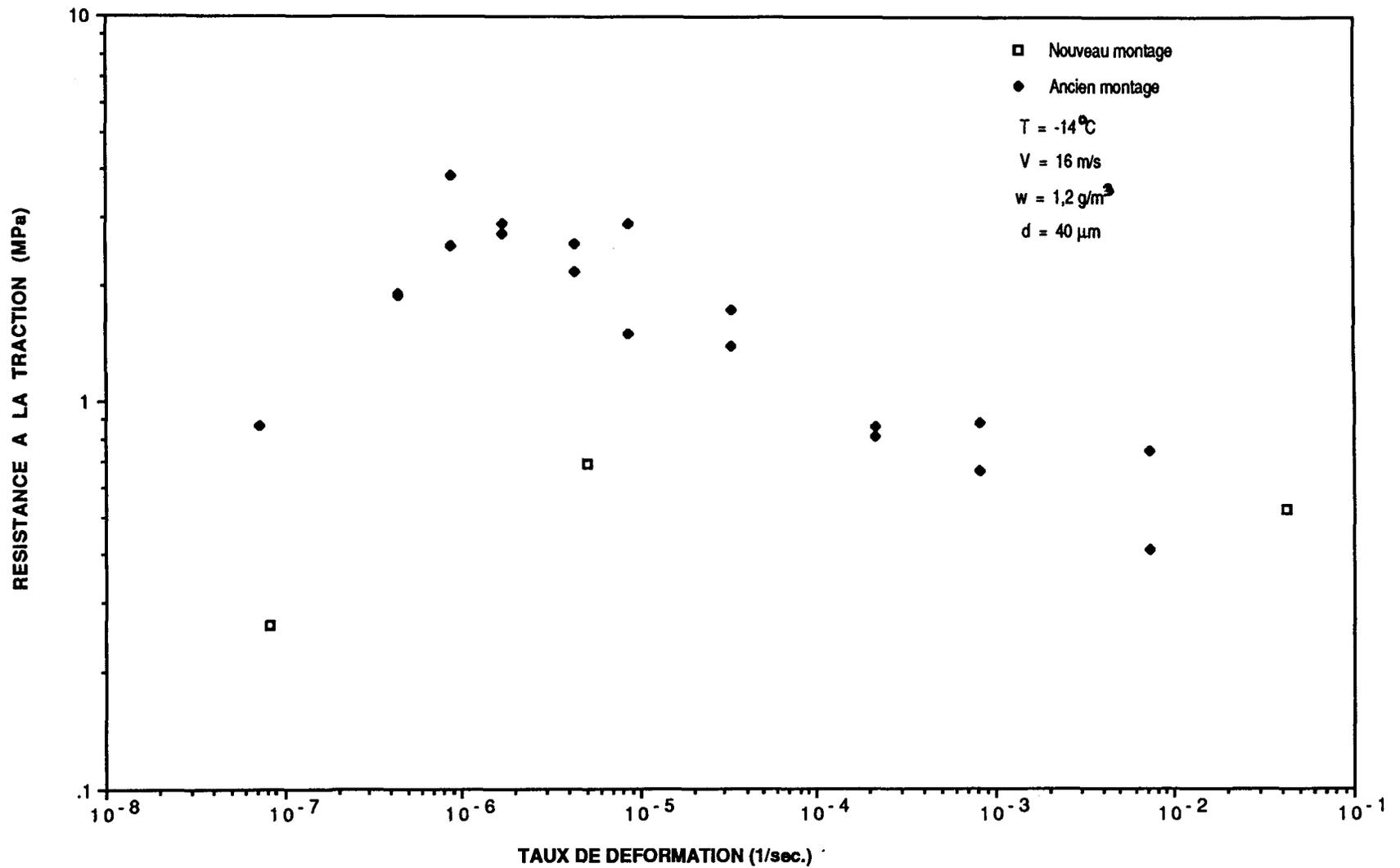


Figure 41: Comparaison des résultats du nouveau montage avec ceux de l'ancien montage pour les essais de traction (T = -14°C; v = 16 m/s; w = 1,2 g/m<sup>3</sup>; d = 40 μm). Résistance à la traction en fonction du taux de déformation.

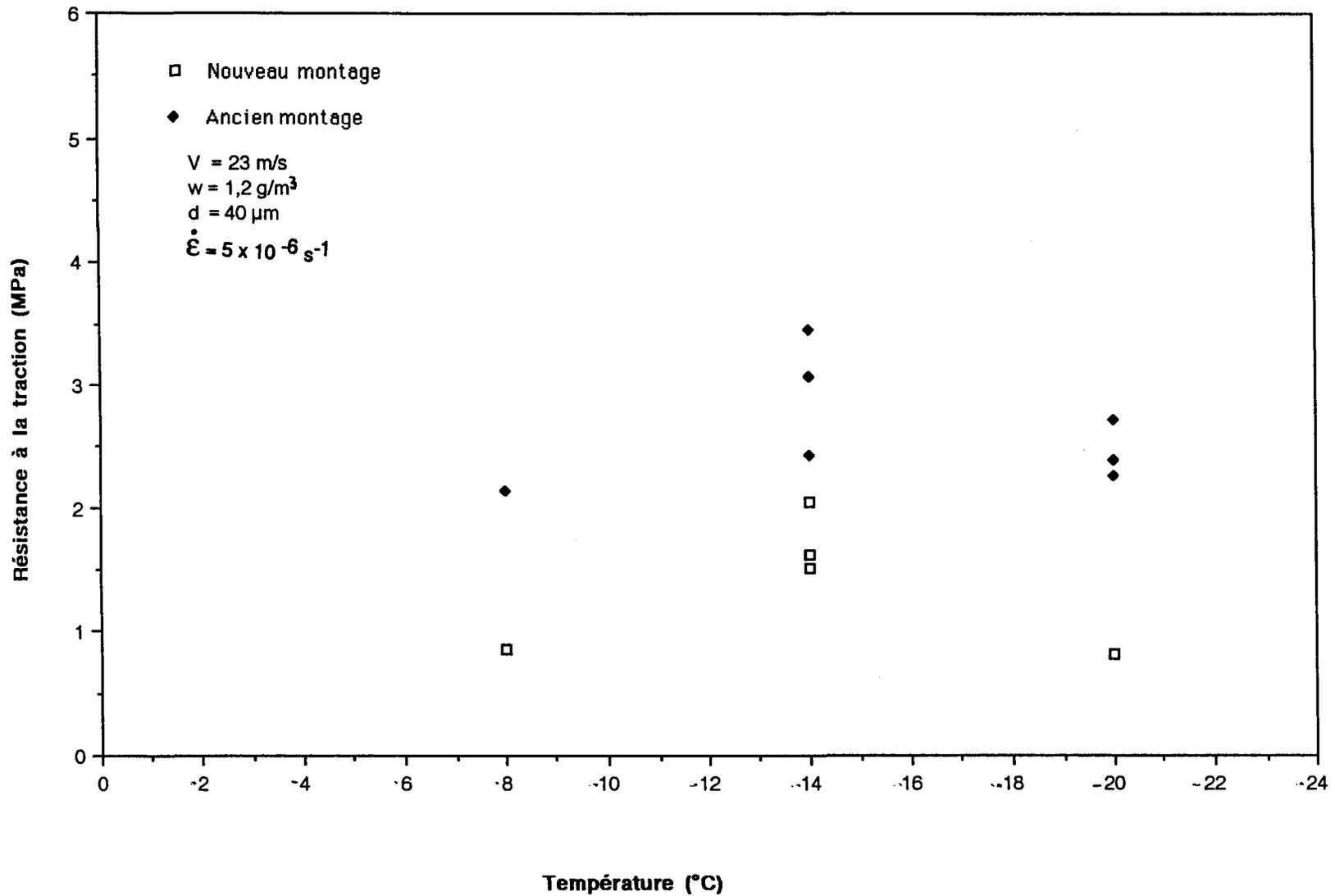


Figure 42: Comparaison des résultats du nouveau montage avec ceux de l'ancien montage pour les essais de traction ( $v = 16 \text{ m/s}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $d = 40 \text{ } \mu\text{m}$ ;  $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ). Résistance à la traction en fonction de la température.

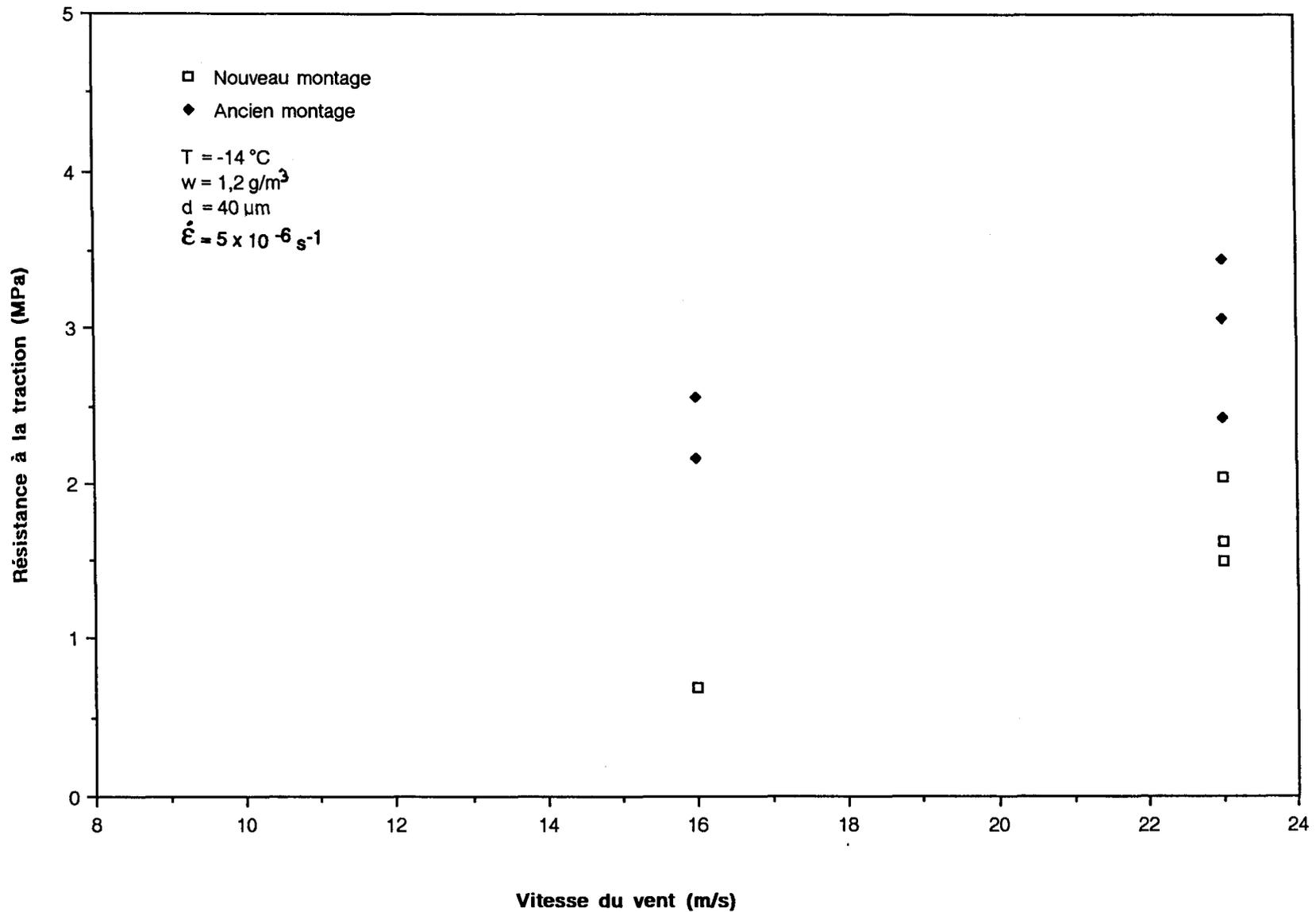


Figure 43: Comparaison des résultats du nouveau montage avec ceux de l'ancien montage pour les essais de traction ( $T = -14^{\circ}\text{C}$ ;  $w = 1,2 \text{ g/m}^3$ ;  $d = 40 \text{ }\mu\text{m}$ ;  $\dot{\epsilon} = 5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ). Résistance à la traction en fonction de la vitesse du vent.

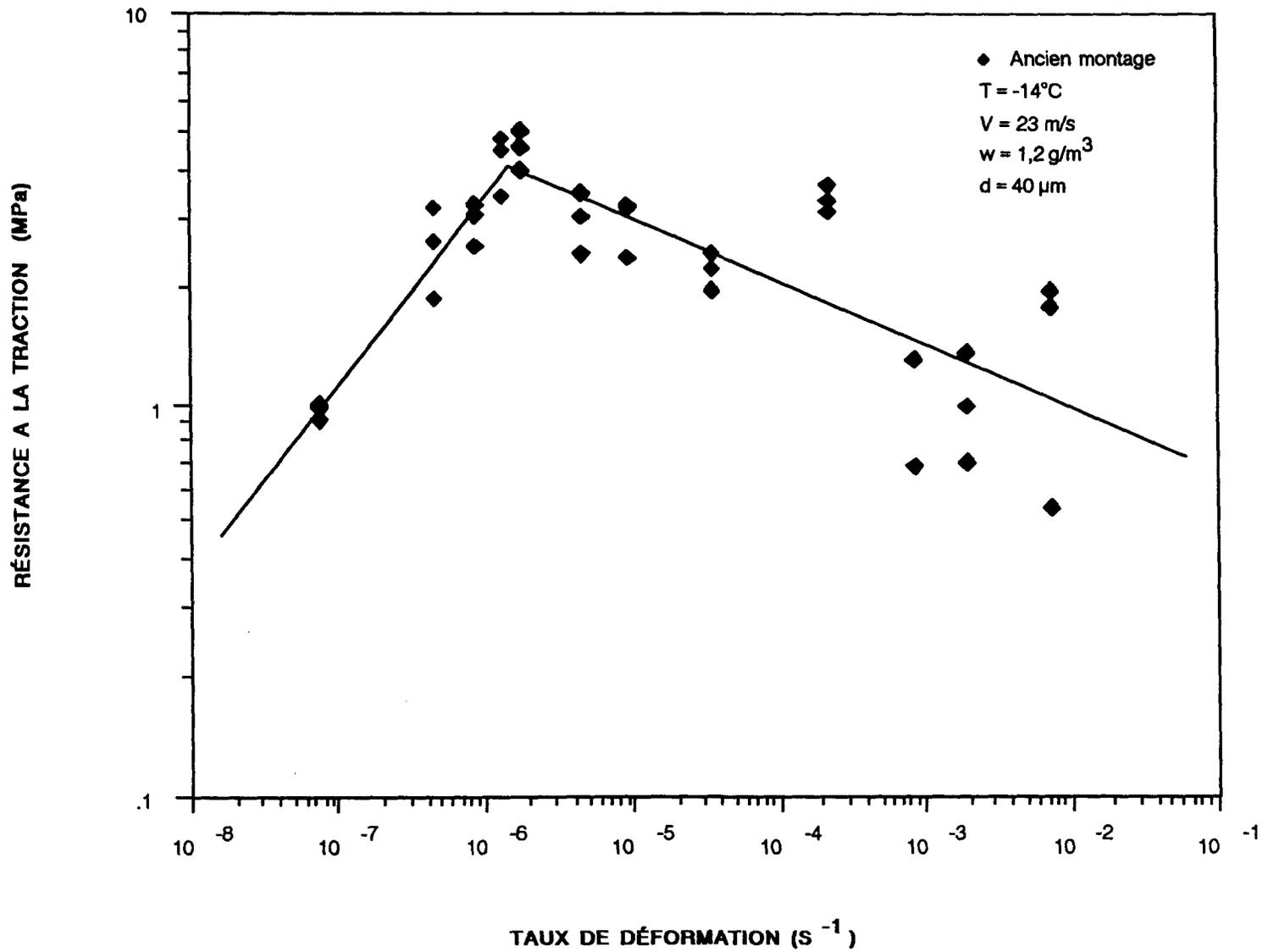


Figure 44: Modélisation de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation (ancien montage)

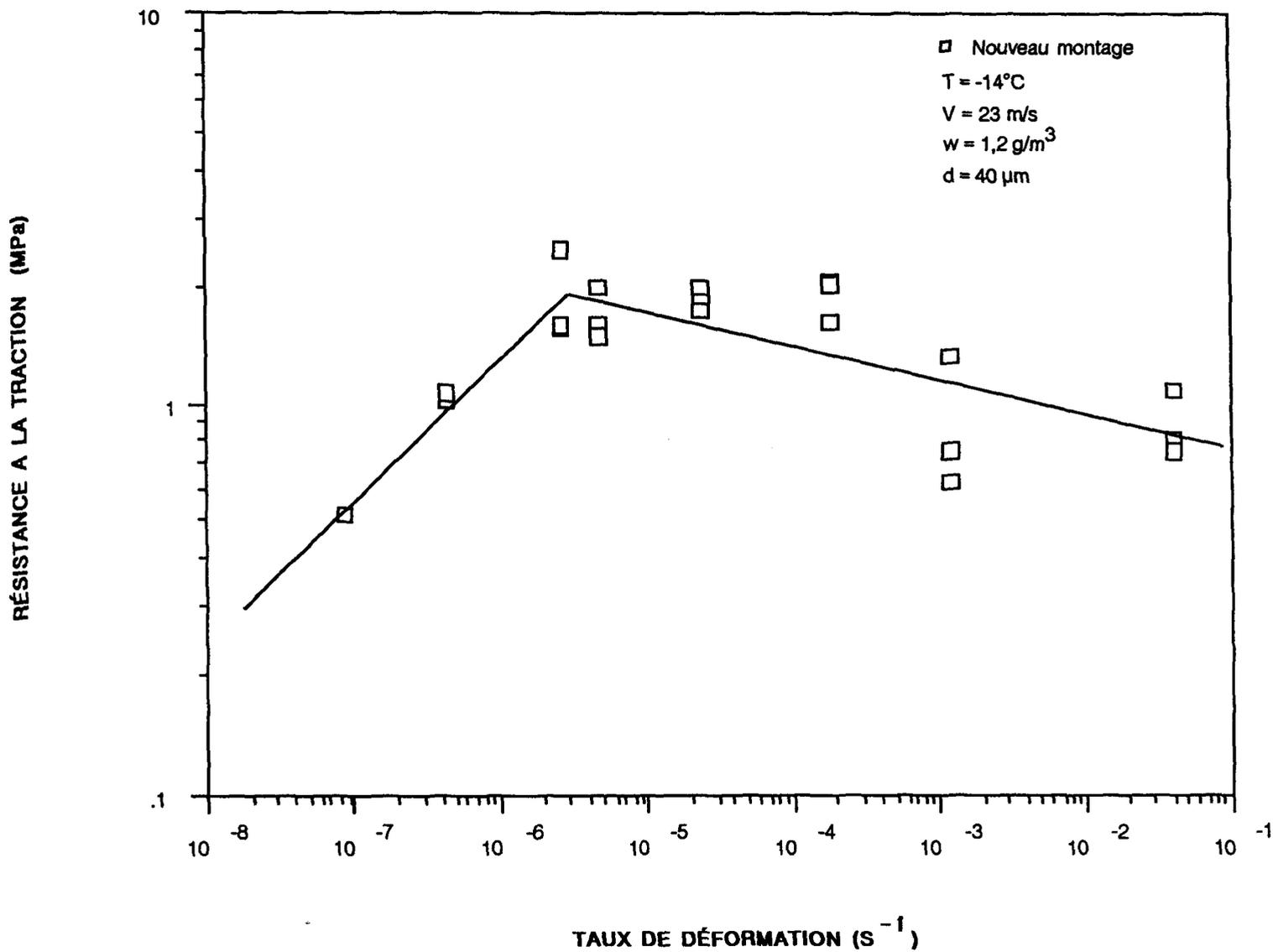


Figure 45: Modélisation de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation (nouveau montage sans coupes)

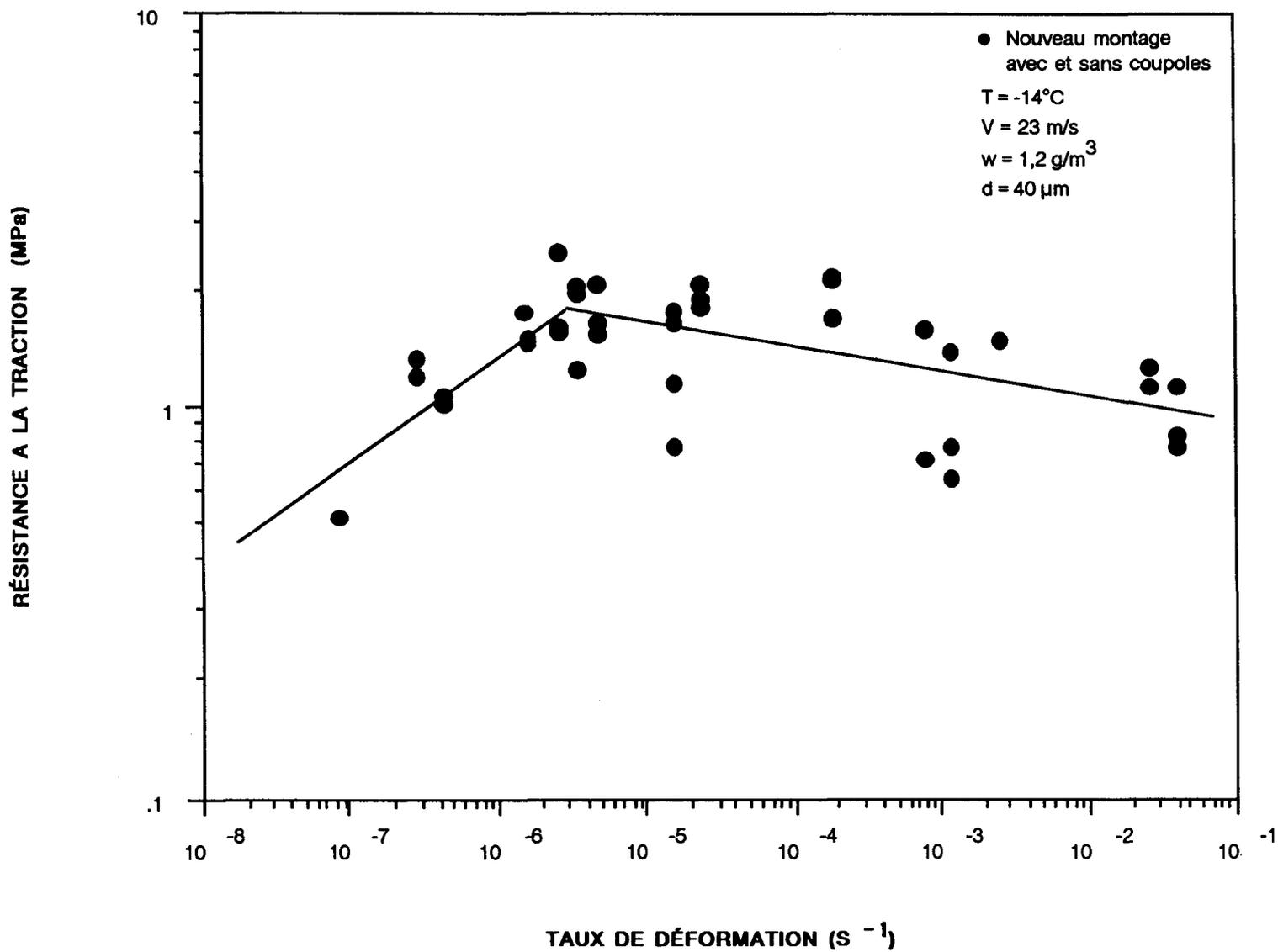


Figure 46: Modélisation de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation (nouveau montage avec et sans coupoles)

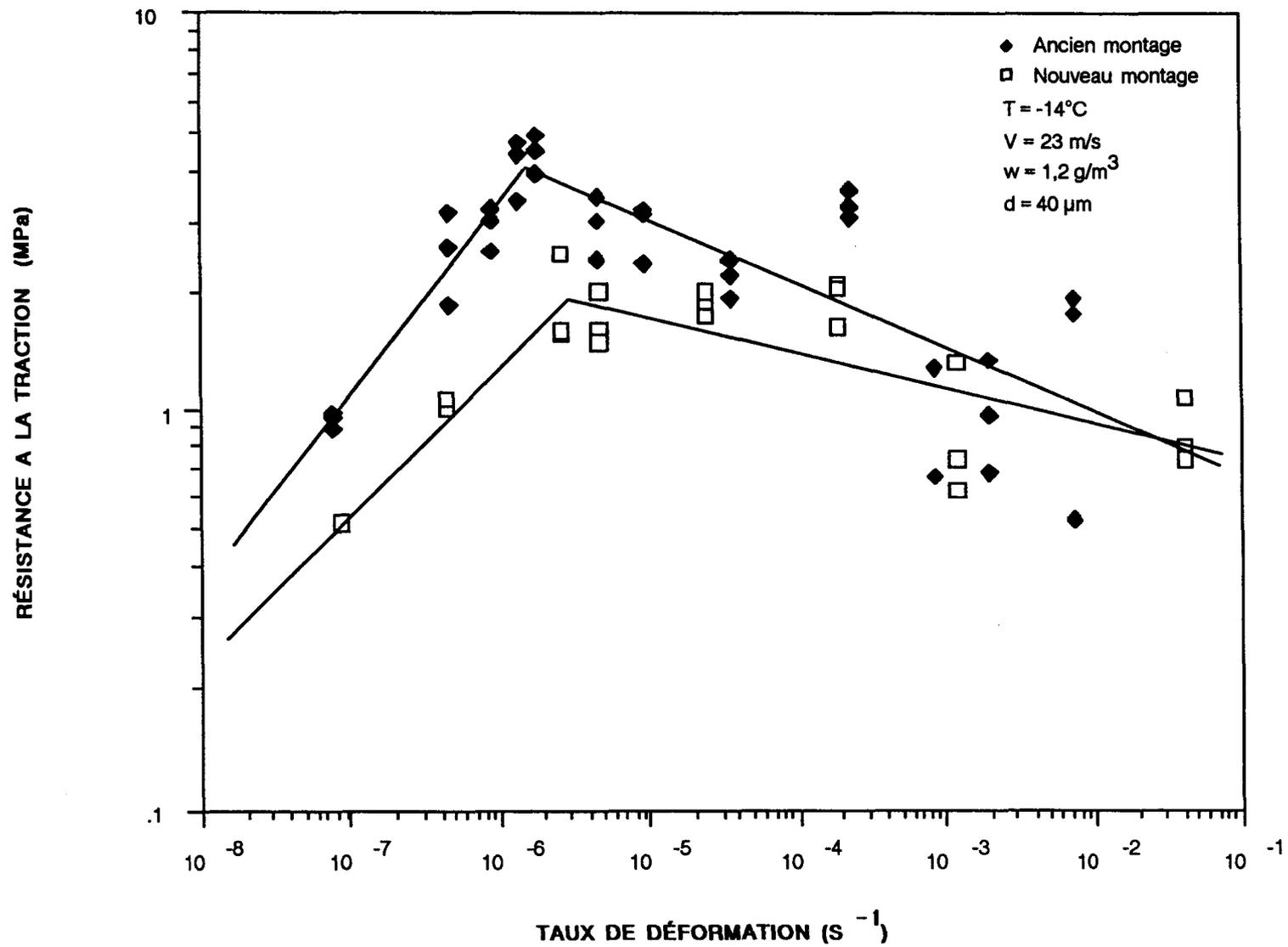


Figure 47: Modélisation de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation (comparaison du nouveau montage sans couples et de l'ancien montage)

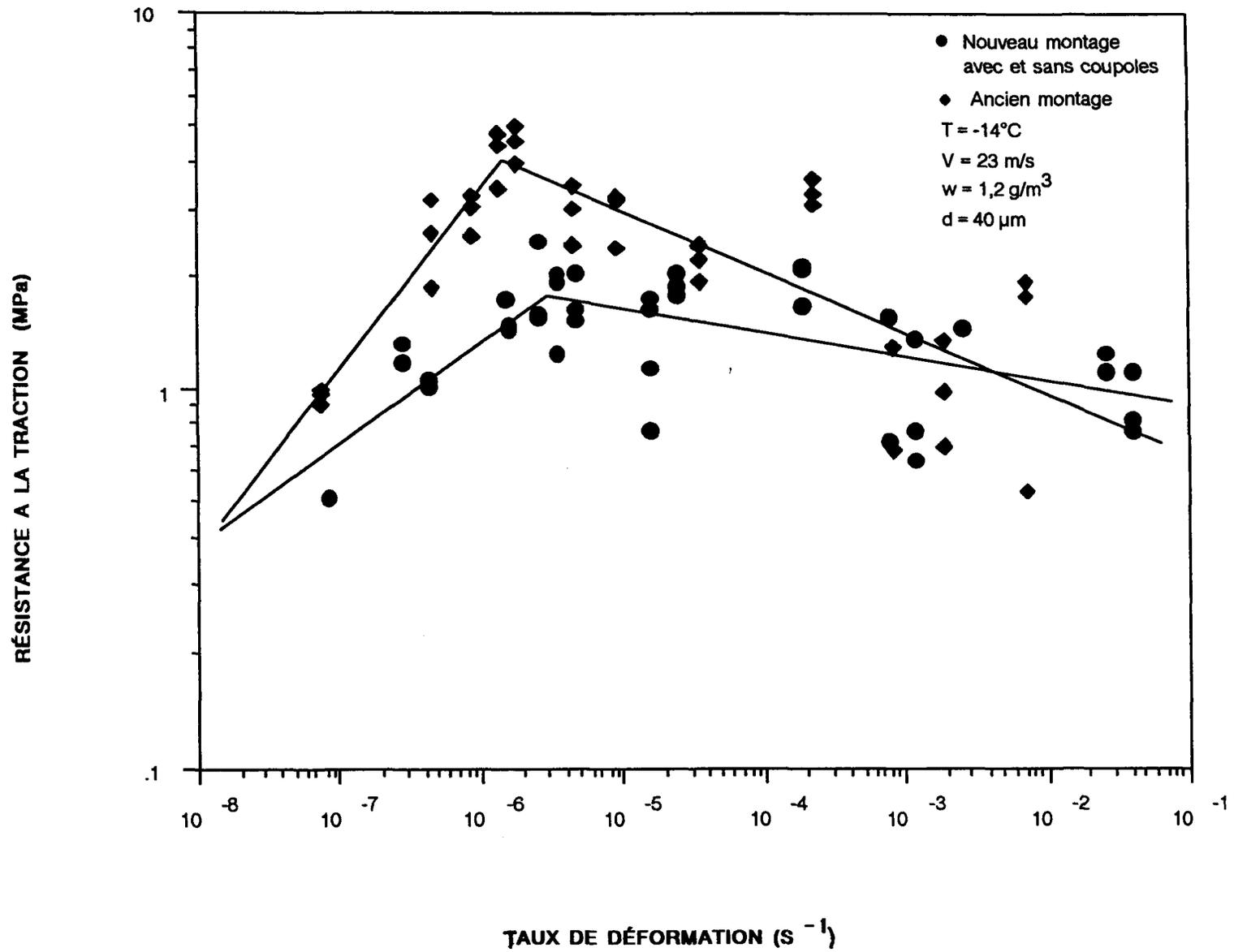


Figure 48: Modélisation de la résistance à la traction en fonction du taux de déformation (comparaison du nouveau montage avec coupoles et sans coupoles combinés, avec l'ancien montage)

## **ANNEXE 3**

```
INTEGER*2 ADAPT,DEVICE,CHANL1,CTRL,RAWVAL,STAT,ADAPTO
INTEGER*2 CHANL2,RAWVA2,RAWVA3,RAWVA4,CHANLO
CHARACTER*2 TOTO
```

```
C=====
C
C      FONCTIONS UTILISEES
C
C=====
```

```
FSTEPAIR(X)=1.78*X*X+71.6*X+16.96
FSTEPEAU(X)=0.73*X*X+8.07*X+0.54
FTAIR(X)=6.17*X+65.78
FTEAU(X)=3.93*X+21.5
```

```
C=====
C
C      INITIALISATION
C      *****
C=====
```

```
ADAPT=1
ADAPTO=0
DEVICE=9
CHANL2=2
CHANL1=1
CHANLO=0
CHANL3=3
CTRL=0
STAT=0
TIM=0.0
ITEMPS=3000
PRESAIR=0.0
PRESEAU=0.0
CALL AOUS(ADAPT,DEVICE,CHANLO,CTRL,0,STAT)
CALL AOUS(ADAPT,DEVICE,CHANL1,CTRL,0,STAT)
CALL DELAY(ADAPT,1000,STAT)
WRITE(*,100) PRESAIR,PRESEAU,DELTA,DELTAE,TIM
```

```
C
C
C      LECTURE DES DONNEES
C      *****
C
```

```
WRITE(*,251)
251  FORMAT(2X,' TEMPS DE FORMATION DE LE GLACE ? (seconde) : ', $)
      READ(*,301) TIME
301  FORMAT(F10.0)
      WRITE(*,200)
200  FORMAT(2X,' PRESSION D''AIR: ', $)
      READ(*,300) AIR
      WRITE(*,250)
250  FORMAT(2X,' PRESSION D''EAU: ', $)
      READ(*,300) EAU
300  FORMAT(F4.0)
```

```
C
C      PRESSION D'AIR: CANNAL 1
C
```

```
CALL AINS(ADAPT,DEVICE,CHANL1,CTRL,RAWVAL,STAT)
```

```
C
C      PRESSION D'EAU: CANAL 2
C
```

```
CALL AINS(ADAPT,DEVICE,CHANL2,CTRL,RAWVA2,STAT)
```

```
C
C      PRESAIR=FLOAT(RAWVAL)*(50./4096.)
C      PRESEAU=FLOAT(RAWVA2)*(50./4096.)
```

BOUCLE DE TEMPS DE FORMATION  
\*\*\*\*\*

DO 10 II=1,ITIME

CONTROLE DE LA VALVE A EAU  
-----

DELTAE=EAU-PRESEAU  
DELE=ABS(DELTAE)  
FSTPE=FSTEPEAU(DELE)  
ISTPE=INT(ABS(FSTPE))  
IISTPE=ISTPE  
IFTEAU=INT(ABS(FTEAU(DELE)))  
IIFTE=IFTEAU  
IF(DELTAE.GE.0)RAWVA4=RAWVA4+IIFTE  
IF(DELTAE.LT.0)RAWVA4=RAWVA4-IIFTE  
IF(RAWVA4.GE.4096)RAWVA4=4095  
IF(RAWVA4.LT.0)RAWVA4=0

STEP DE CORRECTION INITIAL (VALVE A EAU)

CALL AOUS(ADAPT,DEVICE,CHANLO,CTRL,RAWVA4,STAT)

CONTROLE DE LA VALVE A AIR  
-----

DO 20 JJ=1,1  
DELTA A=AIR-PRESAIR  
DELA=ABS(DELTA A)  
FSTPA=FSTEPAIR(DELA)  
ISTPA=INT(ABS(FSTPA))  
IISTPA=ISTPA  
IFTAIR=INT(FTAIR(DELA))  
IIFTA=IFTAIR  
IF(DELTA A.GE.0)RAWVA3=RAWVA3+IIFTA  
IF(DELTA A.LT.0)RAWVA3=RAWVA3-IIFTA  
IF(RAWVA3.GE.4096)RAWVA3=4095  
IF(RAWVA3.LT.0)RAWVA3=0

STEP DE CORRECTION INITIAL (VALVE A AIR)

CALL AOUS(ADAPT,DEVICE,CHANL1,CTRL,RAWVA3,STAT)  
TT=FLOAT(ITEMPS)/1000.0  
TIM=TIM+TT  
CALL DELAY(ADAPT,ITEMPS,STAT)  
IF(DELTA A.GE.0)RAWVA3=RAWVA3-IIFTA+IISTPA  
IF(DELTA A.LT.0)RAWVA3=RAWVA3+IIFTA-IISTPA

STEP DE CORRECTION APRES 3 sec. (VALVE A AIR)

CALL AOUS(ADAPT,DEVICE,CHANL1,CTRL,RAWVA3,STAT)

PRESSION D'AIR: CANNAL 1

CALL AINS(ADAPT,DEVICE,CHANL1,CTRL,RAWVAL,STAT)

PRESAIR=FLOAT(RAWVAL)\*(50./4096.)

CONTINUE

IF(DELTAE.GE.0)RAWVA4=RAWVA4-IIFTE+IISTPE  
IF(DELTAE.LT.0)RAWVA4=RAWVA4+IIFTE-IISTPE

STEP DE CORRECTION APRES 3 sec. (VALVE A EAU)

```
CALL AINS(ADAPT,DEVICE,CHANL2,CTRL,RAWVA2,STAT)
PRESEAU=FLOAT(RAWVA2)*(50./4096.)
DELTAE=EAU-PRESEAU
DELTA A=AIR-PRESAIR
```

-----  
IMPRESSION DES VALEURS  
-----

```
WRITE(*,100) PRESAIR,PRESEAU,DELTA A,DELTAE,TIM
CONTINUE
```

```
FERMETURE DES VALVES APRES FORMATION DE LA GLACE
*****
```

```
CALL AOUS(ADAPT,DEVICE,CHANL0,CTRL,0,STAT)
CALL AOUS(ADAPT,DEVICE,CHANL1,CTRL,0,STAT)
TOTO=CHAR(7)
```

```
8888 WRITE(*,102)
      CALL DELAY(ADAPT,2000,STAT)
CALL AINS(ADAPT,DEVICE,CHANL3,CTRL,RAWVAL,STAT)
      WRITE(*,101) TOTO
      IF(RAWVAL.LT.4000) GO TO 8888
```

```
101  FORMAT(A10)
102  FORMAT(////////,10X,'...LA FORMATION DE GLACE EST TERMINEE...')
100  FORMAT(2X,F10.2,5X,F10.2,F10.2,F10.2,
1    2X,F10.2)
9999 STOP
END
```