

**UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

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

**Par**

**Julien Bilodeau**

**Étude des propriétés mécaniques en cisaillement  
de la glace atmosphérique**

**Avril 1996**



### **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.

*L'air, l'eau, la terre et le feu bercent l'humanité  
depuis le début des temps. Puisse-t-il, l'homme,  
contribuer à ce qu'il en soit toujours ainsi...*

À ma fille Ève,  
À mon fils Vincent,  
À tous mes proches,

## RÉSUMÉ

Alors que des recherches ont déjà été effectuées sur la résistance en traction et en compression de la glace atmosphérique (givre et verglas), il n'existe à peu près pas de valeurs connues pour la résistance au cisaillement de ce type de glace. La connaissance de ces valeurs et des modèles de comportement rhéologique en cisaillement est nécessaire pour l'analyse du comportement des structures sous l'effet du givre et du verglas, pour la détermination des critères de rupture applicables à la glace atmosphérique et pour l'évaluation des contraintes admissibles dans ce matériau pour les domaines fragile et ductile.

L'objectif de cette recherche est de développer une méthode d'évaluation de la résistance au cisaillement de la glace atmosphérique en fonction des conditions météorologiques de formation et du taux de déformation, à partir d'échantillons formés en laboratoire. L'objectif premier est de déterminer les propriétés mécaniques du matériau; cependant, la diversité des essais de cisaillement effectués au cours de la présente étude a été également planifiée pour évaluer les influences des différents paramètres dimensionnels de l'appareil et de l'éprouvette sur les mesures obtenues. C'est pourquoi un seul type de glace a été utilisé pour la fabrication des éprouvettes.

Les échantillons de glace atmosphérique sont formés en laboratoire dans des conditions préétablies et contrôlées. Les échantillons obtenus sont plus adéquats que ceux formés dans des conditions atmosphériques naturelles. La glace, du givre dur dont la masse volumique est d'environ  $850 \text{ kg/m}^3$ , est formée à partir de gouttelettes surfondues projetées sur un obstacle (le collecteur) qui est placé dans une soufflerie en circuit ouvert. Les valeurs des paramètres atmosphériques de formation utilisés sont de  $-14^\circ\text{C}$  pour la température de l'air dans la chambre froide,  $16 \text{ m/s}$  pour la vitesse de l'air dans la soufflerie,  $1,2 \text{ g/m}^3$  pour la teneur en eau de l'air et de  $40 \mu\text{m}$  pour le diamètre volumique médian des gouttelettes. Les éprouvettes sont usinées à 68 ou 70 mm de diamètre et à 8,10 ou 12 mm

d'épaisseur sur un tour parallèle. Un groupe de 6 éprouvettes peut être produit sur le même manchon (glace et collecteur). Finalement, le collecteur est démonté pour permettre la manipulation des éprouvettes.

L'évaluation de la résistance au cisaillement est effectuée par une méthode de poinçonnage en utilisant une presse mécanique à vitesse de déplacement contrôlée. L'appareil de cisaillement utilisé a été conçu de façon à permettre le confinement total ou partiel de l'échantillon de glace. Dans ces deux modes de chargement, les 213 ruptures des éprouvettes de glace ont été effectuées à des taux de déformation ( $\dot{\gamma}$ ) variant de 0,0001 à 40  $\text{sec}^{-1}$ . Des vitesses de déplacement du poinçon de 0,002 à 400 mm/min ont été utilisées pour obtenir ces taux de déformation.

En confinement partiel, les contraintes maximales de rupture passent par un maximum dans la zone de transition ductile-fragile du matériau. Elles atteignent 1,5 MPa au taux de déformation de 0,03  $\text{sec}^{-1}$ . En confinement total, la contrainte de rupture croît avec le taux de déformation et atteint 8 MPa pour le taux de 40  $\text{sec}^{-1}$ .

Quoiqu'il soit utilisé pour l'identification des essais, il a été possible de démontrer que la valeur du taux de déformation, déterminé par la relation entre le déplacement du poinçon et le jeu radial entre ce dernier et la matrice, ne représente pas le comportement réel de l'éprouvette. Il a été constaté que la valeur du module de cisaillement variait de façon presque proportionnelle avec celle du jeu, ce qui conduit à l'inexactitude du modèle de déformation utilisé. Cette relation existe entre le jeu et les valeurs du module puisque les dimensions utilisées n'ont pas eu d'influence sur les taux de montée en charge de l'éprouvette. Cependant, la dimension du jeu occasionne une légère baisse de la valeur des contraintes maximales lorsque sa dimension est supérieure à 2 mm.

En utilisant le modèle de déformation énoncé dans cette étude, la valeur moyenne du module de cisaillement est 2,2 MPa. En se servant de la même méthode que Lavrov (1969) pour déterminer la déformation appliquée à l'éprouvette, les valeurs de ce module se situent entre 12 et 73 MPa pour les essais en confinement total et entre 7 et 40 MPa pour ceux en confinement partiel.

Finalement, ces travaux ont permis de démontrer que la valeur de la rigidité de cisaillement brute de l'éprouvette de glace variait proportionnellement avec celle de la contrainte maximale. Cette rigidité représente le taux de montée en charge de la contrainte par mètre de déplacement du poinçon. Elle atteint 7,5 GPa/m au taux de déformation de 40  $\text{sec}^{-1}$  pour les essais effectués en confinement total et 5 GPa/m dans la zone de transition pour ceux effectués en confinement partiel.

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier et à témoigner ma gratitude à mon directeur de recherche, Monsieur Jacques Druez, Professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi et Directeur de l'Équipe de Recherche en Ingénierie du Givrage des Structures (ERIGS). Je lui suis reconnaissant de la confiance et du soutien qu'il m'a témoignés au cours de la réalisation de ce travail. Son professionnalisme, sa rigueur scientifique et ses connaissances m'ont été profitables et demeurent pour moi un exemple.

Je suis aussi reconnaissant envers Monsieur Jean-Louis Laforte, Professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi, dont l'enseignement dans le domaine de l'environnement nordique ainsi que les conseils m'ont été des plus propices. Je le remercie également pour avoir accepté de faire partie du jury.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur Yves Faucher, Professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi, pour m'avoir fait profiter de ses connaissances dans le domaine de la résistance des matériaux.

Mes remerciements vont pareillement à Madame Marie Bernard, Professeur à l'École Polytechnique de Montréal, pour avoir accepté de faire partie du jury.

Je remercie aussi Messieurs Marco Boudreault, assistant de recherche de l'Équipe de Recherche en Ingénierie du Givrage des Structures, et Serge Gauthier, technicien de laboratoire, pour leurs collaborations et pour les discussions fructueuses que nous avons eues ensemble.

Finalement, je m'en voudrais d'oublier les encouragements et l'appui que m'a prodigués mon amie et ma compagne Sylvie. Merci pour ta patience et pour ta joie de vivre, elles sont à la source des énergies investies dans ce travail.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>iii</b>
<b>REMERCIEMENTS.....</b>	<b>v</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>xi</b>
<b>NOMENCLATURE.....</b>	<b>xvii</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>CADRE DE L'ÉTUDE .....</b>	<b>3</b>
1.1 OBJECTIF DE LA RECHERCHE.....	3
1.2 SOMMAIRE DES RECHERCHES .....	4
1.3 SPÉCIFICITÉ DE LA RECHERCHE .....	4
1.4 CONFIGURATION DES ÉPROUVETTES .....	5
1.4.1 Essais de compression.....	6
1.4.2 Essais de traction.....	7
1.4.3 Essai d'adhésion axiale.....	8
1.4.4 Essais de cisaillement.....	10
<b>PHYSIQUE DE LA GLACE DE TYPE ATMOSPHERIQUE .....</b>	<b>11</b>
2.1 TERMINOLOGIE ET CLASSIFICATION .....	11
2.2 MODES DE FORMATION .....	12
2.2.1 Formation naturelle.....	13
2.2.2 Formation en laboratoire.....	13
2.2.2.1 Technique de formation.....	14
2.2.2.2 Paramètres de formation .....	15
2.3 MICROSTRUCTURE DES DÉPÔTS DE GLACE.....	16
2.4 COMPORTEMENT RHÉOLOGIQUE .....	17

2.4.1 Propriétés mécaniques .....	18
2.4.2 Paramètres mécaniques .....	22
<b>THÉORIE ET MODÈLE DE DÉFORMATION.....</b>	<b>26</b>
3.1 PRINCIPE DE L'ESSAI DE CISAILLEMENT.....	26
3.2 DÉFORMATION DANS UN PLAN .....	28
3.3 ÉQUIVALENCE DES DÉFORMATIONS.....	30
3.4 ANALYSE DES DÉFORMATIONS .....	32
3.5 SIMILITUDE DE COMPORTEMENT.....	37
3.6 MODÈLE DE L'ESSAI DE CISAILLEMENT.....	38
<b>PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE ET APPAREILLAGE.....</b>	<b>41</b>
4.1 CADRE DES EXPÉRIMENTATIONS.....	41
4.2 ENVIRONNEMENT ET MANIPULATIONS .....	41
4.3 ÉQUIPEMENTS RÉFRIGÉRÉS.....	42
4.4 GOUTTELETTES SURFONDUES.....	43
4.4.1 Principe de formation .....	43
4.4.2 Circuits d'alimentation.....	43
4.5 SOUFFLERIE.....	45
4.5.1 Description générale.....	45
4.5.2 Caractéristiques de fonctionnement .....	45
4.5.3 Mesure de la vitesse de l'air .....	46
4.5.4 Contrôle de la vitesse de l'air .....	48
4.6 COLLECTEUR.....	51
4.7 FABRICATION DES ÉPROUVETTES.....	52
4.8 APPAREIL DE CISAILLEMENT .....	53
4.9 MISE EN CHARGE DES ÉPROUVETTES.....	54
4.10 ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNÉES .....	56
<b>PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES .....</b>	<b>57</b>
5.1 VALEURS DES PARAMÈTRES .....	57
5.1.1 Température et vitesse de l'air.....	57
5.1.2 Teneur en eau de l'air .....	58
5.1.3 Diamètre volumique médian des gouttelettes .....	61
5.2 INTERACTION ENTRE LES PARAMÈTRES .....	64
<b>GLACE ATMOSPHÉRIQUE PRODUITE EN LABORATOIRE....</b>	<b>66</b>
6.1 MANCHON DE GLACE.....	66
6.2 COEFFICIENT DE CAPTATION .....	68
6.3 MASSE VOLUMIQUE DE LA GLACE.....	69



<b>ESSAIS DE CISAILLEMENT .....</b>	<b>72</b>
7.1 PARAMÈTRES DES ESSAIS.....	72
7.2 INFLUENCE DES PARAMÈTRES .....	74
7.3 RÉSULTATS DES ESSAIS .....	76
7.3.1 Courbes représentatives des essais.....	77
7.3.2 Caractéristiques des ruptures.....	78
7.3.3 Module de cisaillement.....	80
7.3.4 Rigidité de cisaillement brute.....	83
7.3.5 Courbes des contraintes maximales.....	85
<b>VALIDITÉ DES RÉSULTATS .....</b>	<b>88</b>
8.1 COMPARAISON AVEC D'AUTRES TYPES D'ESSAIS...	88
8.2 AUTRES TECHNIQUES DE CISAILLEMENT .....	89
8.3 MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS .....	90
<b>RECOMMANDATIONS.....</b>	<b>93</b>
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>95</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>97</b>
<b>ANNEXE I.....</b>	<b>A I.1</b>
<b>ANNEXE II .....</b>	<b>A II.23</b>
<b>ANNEXE III.....</b>	<b>A III.77</b>

## LISTE DES TABLEAUX

### TABLEAUX SITUÉS À L'INTÉRIEUR DU TEXTE:

- Tableau 5.1:** Valeurs moyennes et écarts types de la teneur en eau pour les différents ajustements de la pression d'air et du débit d'eau.
- Tableau 5.2:** Valeurs moyennes des diamètres volumiques obtenus avec les mêmes ajustements de la pression d'air et du débit d'eau.
- Tableau 6.1:** Valeurs statistiques des diamètres pour l'ensemble des manchons de glace.
- Tableau 6.2:** Valeurs statistiques des paramètres du tableau A I.10.
- Tableau 6.3:** Paramètres statistiques pour les masses volumiques du tableau A I.12.
- Tableau 7.1:** Nombre des essais effectués pour chacune des valeurs des paramètres de l'appareil et des éprouvettes.

### TABLEAUX SITUÉS À L'ANNEXE A I:

- Tableau A I.1:** Vitesse de l'air en fonction de l'ouverture des ailettes restrictives.
- Tableau A I.2:** Vitesses de l'air sur un axe vertical passant par le point  $a$  pour 4 collecteurs.

**Tableau A I.3:** Valeurs des pressions et des vitesses mesurées pendant la formation des manchons utilisés pour fabriquer les éprouvettes.

**Tableau A I.4:** Valeurs des pressions et des vitesses mesurées pendant la formation des manchons utilisés dans les travaux préliminaires.

**Tableau A I.5:** Relevé des mesures de la teneur en eau de l'air dans la soufflerie.

**Tableau A I.6:** Valeurs de la teneur en eau obtenues en fonction de l'alimentation de la buse de pulvérisation.

**Tableau A I.7:** Relevé de la distribution des diamètres des gouttelettes.

**Tableau A I.8:** Résultats des relevés du diamètre volumique médian des gouttelettes.

**Tableau A I.9:** Fiche descriptive des paramètres et des caractéristiques du manchon numéro 29.

**Tableau A I.10:** Caractéristiques de formation des manchons et de la valeur de la masse volumique de la glace.

**Tableau A I.11:** Procédé de mesure de la masse volumique de la glace par le principe d'Archimède.

**Tableau A I.12:** Valeurs des masses volumiques obtenues en utilisant le principe d'Archimède.

**Tableau A I.13:** Paramètres utilisés et contraintes maximales obtenues pour chacun des essais de cisaillement.

**Tableau A I.14:** Caractéristiques de la montée en charge et module de Coulomb pour quelques essais de cisaillement.

## LISTE DES FIGURES

### FIGURES SITUÉES À L'INTÉRIEUR DU TEXTE:

- Figure 2.1:** Schéma du procédé de formation de la glace atmosphérique.
- Figure 2.2:** Essai à faible contrainte imposée (d'après Mellor, 1979).
- Figure 2.3:** Essai à vitesse de déformation imposée (d'après Mellor, 1979).
- Figure 2.4:** Courbe des essais uniaxiaux en compression et en traction de la glace isotrope horizontale en fonction du taux de déformation (d'après Nadreau et Michel, 1984).
- Figure 2.5:** Élément de référence cubique d'un matériau sollicité mécaniquement. a) Sollicité par la force  $P_n$ . b) Sollicité par la force  $P_p$ .
- Figure 3.1:** Schéma du principe de fonctionnement de l'appareil de cisaillement de la glace atmosphérique.
- Figure 3.2:** Déformations normale et de cisaillement d'un élément dans le plan  $xy$ .
- Figure 3.3:** Déformations normales et de cisaillement d'un élément.
- Figure 3.4:** Cercle de Mohr des déformations. (a)- Pour une déformation en cisaillement pur. (b)- Pour des déformations normales égales et de signes opposés.

- Figure 3.5:** Orientation des déformations principales  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  selon respectivement les axes  $x'$  et  $y'$ .
- Figure 3.6:** Cercles de Mohr des déformations associées à un essai de traction et à un essai de compression.
- Figure 3.7:** Superposition des cercles de Mohr pour les essais de compression, de cisaillement et de traction. (a)- Même déformation de cisaillement. (b)- Égalité entre la déformation  $\gamma_{\max}$  de l'essai de cisaillement pur et celles normales  $\epsilon_x$ , en valeur absolue, des autres essais.
- Figure 3.8:** Modèle de déformation d'un élément de glace soumis à l'essai de cisaillement.
- Figure 4.1:** Dimensions de la chambre froide et disposition des appareils.
- Figure 4.2:** Emplacement des points de lecture de la vitesse de l'air dans la section d'accès.

#### FIGURES SITUÉES À L'ANNEXE A II:

- Figure A II.1:** Schéma de l'appareillage et des systèmes d'acquisition et de contrôle.
- Figure A II.2:** Circuits d'alimentation en eau et en air de la buse de pulvérisation.
- Figure A II.3:** Profil des vitesses de l'air en présence d'un collecteur de 30,4 mm.
- Figure A II.4:** Variation de la vitesse de l'air pour quatre différents modes de fonctionnement de la soufflerie dans les mêmes conditions de formation de la glace.
- Figure A II.5:** Assemblage du collecteur cylindrique.
- Figure A II.6:** Tige guide et segment cylindrique du collecteur.

- Figure A II.7:** Embouts droit et gauche du collecteur.
- Figure A II.8:** Façonnage des éprouvettes sur le tour parallèle.
- Figure A II.9:** Éprouvettes après le désassemblage du collecteur.
- Figure A II.10:** Dimensions des éprouvettes de glace.
- Figure A II.11:** Assemblage de l'appareil de cisaillement avec le segment cylindrique et l'éprouvette de glace.
- Figure A II.12:** Assemblage décalé sur l'axe de l'appareil de cisaillement.
- Figure A II.13:** Corps principal de l'appareil de cisaillement.
- Figure A II.14:** Tige guide de l'appareil de cisaillement.
- Figure A II.15:** Bague d'appui du poinçon de l'appareil de cisaillement.
- Figure A II.16:** Bague d'appui de la matrice de l'appareil de cisaillement.
- Figure A II.17:** Écrou moleté du poinçon de l'appareil de cisaillement.
- Figure A II.18:** Rondelle de blocage de l'appareil de cisaillement.
- Figure A II.19:** Adaptateur guide fixé à la cellule de charge de la presse.
- Figure A II.20:** Assemblage des pièces du poinçon avec l'éprouvette de glace.
- Figure A II.21:** Assemblage des pièces de la matrice avec l'éprouvette de glace.
- Figure A II.22:** Graphique de la distribution du nombre et du volume des gouttelettes.
- Figure A II.23:** Position relative des valeurs des diamètres volumiques des gouttelettes en fonction de la pression d'air de la buse.
- Figure A II.24:** Photographie d'un manchon dans la zone d'accès de la soufflerie.

- Figure A II.25:** Photographie des parties de quelques éprouvettes qui ont été rompues lors des essais de cisaillement.
- Figure A II.26:** Distribution des valeurs de la masse volumique de la glace pour chacune des méthodes de mesure.
- Figure A II.27:** Essai de cisaillement en confinement total et à taux de déformation lent de l'éprouvette.
- Figure A II.28:** Essai de cisaillement en confinement total et à taux de déformation intermédiaire de l'éprouvette.
- Figure A II.29:** Essai de cisaillement en confinement total et à taux de déformation rapide de l'éprouvette.
- Figure A II.30:** Essai de cisaillement en confinement partiel et à taux de déformation lent de l'éprouvette.
- Figure A II.31:** Essai de cisaillement en confinement partiel et à taux de déformation intermédiaire de l'éprouvette.
- Figure A II.32:** Essai de cisaillement en confinement partiel et à taux de déformation rapide de l'éprouvette.
- Figure A II.33:** Module de cisaillement de la glace en fonction du taux de déformation.
- Figure A II.34:** Rigidité de cisaillement brute de l'éprouvette en fonction du taux de déformation.
- Figure A II.35:** Déplacement total du poinçon pour toute la montée en charge en fonction du taux de déformation.
- Figure A II.36:** Rigidité de cisaillement brute de l'éprouvette en fonction de la vitesse de déplacement du poinçon.
- Figure A II.37:** Contrainte maximale en fonction du taux de déformation: confinement total, jeu de 0,43 mm, éprouvettes de 8, 10 et 12 mm.

**Figure A II.38:** Contrainte maximale en fonction du taux de déformation: confinement total, jeu de 0,75 mm, éprouvettes de 8 mm.

**Figure A II.39:** Contrainte maximale en fonction du taux de déformation: confinement total, jeu de 0,75 mm, éprouvettes de 10 mm.

**Figure A II.40:** Contrainte maximale en fonction du taux de déformation: confinement total, jeu de 0,75 mm, éprouvettes de 12 mm.

**Figure A II.41:** Contrainte maximale en fonction du taux de déformation: confinement total, jeu de 2,19 mm, éprouvettes de 10 mm.

**Figure A II.42:** Contrainte maximale en fonction du taux de déformation: confinement partiel, jeu de 0,43 mm, éprouvettes de 10 mm.

**Figure A II.43:** Contrainte maximale en fonction du taux de déformation: confinement partiel, jeu de 0,75 mm, éprouvettes de 8, 10 et 12 mm.

**Figure A II.44:** Contrainte maximale en fonction du taux de déformation: confinement partiel, jeu de 2,19 mm, éprouvettes de 10 mm.

**Figure A II.45:** Superposition des modèles de la contrainte maximale en fonction du taux de déformation.

**Figure A II.46:** Modèle général de la contrainte maximale en fonction du taux de déformation pour les confinements total et partiel.

**Figure A II.47:** Contraintes maximales en fonction du taux de déformation de quelques essais en traction effectués par Tremblay (1991).



- Figure A II.48:** Contraintes maximales en fonction du taux de déformation de quelques essais en traction et en compression effectués par Druez et al. (1987).
- Figure A II.49:** Superposition des courbes des contraintes maximales en fonction du taux de déformation pour les essais de traction, de compression et de cisaillement.
- Figure A II.50:** Superposition des courbes des contraintes maximales pour les essais de traction, de compression et de cisaillement.
- Figure A II.51:** Résultante vectorielle de la déformation de la section de l'éprouvette.
- Figure A II.52:** Déformation de la section de l'éprouvette dans la direction de l'axe z.
- Figure A II.53:** Déformation de la section de l'éprouvette dans la direction de l'axe y.
- Figure A II.54:** Valeurs des contraintes normales dans la direction de l'axe y de la section de l'éprouvette.
- Figure A II.55:** Valeurs des contraintes normales dans la direction de l'axe z de la section de l'éprouvette.
- Figure A II.56:** Valeurs des contraintes normales dans la direction de l'axe x de la section de l'éprouvette.
- Figure A II.57:** Valeurs des contraintes de cisaillement dans le plan yz dans la section de l'éprouvette.
- Figure A II.58:** Valeurs maximums des contraintes principales dans la section de l'éprouvette.
- Figure A II.59:** Valeurs minimums des contraintes principales dans la section de l'éprouvette.
- Figure A II.60:** Valeurs des contraintes de von Mises dans la section de l'éprouvette.

## NOMENCLATURE

$C_p$	Course du poinçon pendant la montée en charge
$D$	Déplacement du poinçon
$D_c$	Diamètre du collecteur
$D_e$	Diamètre moyen équivalent du manchon
$D_m$	Diamètre intérieur de la matrice
$D_p$	Diamètre extérieur du poinçon
$d_v$	Diamètre volumique médian des gouttelettes
$e$	Épaisseur équivalente de la glace
$E$	Module de Young
$E_e$	Épaisseur de l'éprouvette
$f$	Facteur de forme de la courbe de montée en charge
$F$	Force appliquée sur l'éprouvette
$F_m$	Force maximale appliquée sur l'éprouvette au pic de charge
$g$	Accélération gravitationnelle
$G$	Module de cisaillement (module de Coulomb)
$G_{str}$	Module de déformation en cisaillement
$I_a$	Taux d'accumulation de la glace sur le manchon
$J_d$	Jeu diamétral entre le poinçon et la matrice
$J_r$	Jeu radial entre le poinçon et la matrice
$m$	Pente de la droite de régression ajustée à la courbe de charge

$m_g$	Masse de la glace
$P_a$	Pression d'air d'alimentation de la buse de pulvérisation
$Q_e$	Débit d'eau d'alimentation de la buse de pulvérisation
$R$	Rigidité de cisaillement brut de l'éprouvette de glace
$R_c$	Rayon du collecteur
$S$	Surface de la section de rupture de l'éprouvette
$T$	Température de l'air
$t_f$	Temps de formation d'un manchon
$U_d$	Énergie de distorsion
$v$	Vitesse de l'air dans la soufflerie
$v_t$	Vitesse de déplacement de la traverse de la presse
$W$	Teneur en eau de l'air dans la soufflerie
$\eta$	Coefficient de captation
$\nu$	Coefficient de Poisson
$\tau$	Contrainte de cisaillement
$\tau_m$	Contrainte de cisaillement maximale au pic de charge
$\sigma$	Contrainte de tension ou de compression
$\gamma$	Déformation de cisaillement
$\varepsilon$	Déformation normale
$\rho_a$	Masse volumique de l'air
$\rho_e$	Masse volumique de l'eau
$\rho_g$	Masse volumique de la glace
$\dot{\gamma}$	Taux de déformation en cisaillement
$\dot{\varepsilon}$	Taux de déformation en tension ou compression

## INTRODUCTION

Dans plusieurs régions du monde, la formation de la glace atmosphérique sur les ouvrages exposés est observée fréquemment et fait l'objet d'attention particulière afin d'en contrer le plus possible les divers inconvénients. À chaque année, des pertes matérielles importantes et aussi de vies humaines sont dues à ce type de formation de glace.

La glace atmosphérique se forme dans l'atmosphère à partir de la vapeur d'eau ou au niveau du sol lors des averses de pluie verglaçante et en présence de brouillard givrant. Ses différents aspects sont la neige, le grésil, la grêle, le verglas et le givre. C'est sous ce dernier aspect que les propriétés rhéologiques de la glace sont étudiées et présentées dans ce mémoire. Les échantillons de givre, utilisés pour la fabrication des éprouvettes, sont produits en laboratoire dans des conditions atmosphériques contrôlées et préétablies. Dans ce domaine de recherche, des études antérieures ont été effectuées sur l'adhérence de la glace à divers matériaux ainsi que sur ses propriétés mécaniques en compression et en tension. Compte tenu des limitations de forme des éprouvettes qu'il est possible d'obtenir à partir des échantillons de glace, des propriétés mécaniques particulières et des manipulations délicates du matériau, il s'avère utile d'effectuer d'autres types d'essais mécaniques pour permettre une meilleure évaluation des comportements observés. C'est pourquoi, la présente étude porte sur les propriétés mécaniques en cisaillement de la glace atmosphérique.

Pour réaliser les essais en cisaillement, un appareil a été spécifiquement conçu et adapté pour utiliser une forme d'éprouvette qui s'apparente à celle usinée pour les essais d'adhésion. La résistance au cisaillement de la glace est mesurée par la technique du poinçonnage qui consiste à perforer un matériau à l'aide d'un poinçon et d'une matrice. L'appareil permet d'effectuer le poinçonnage de l'éprouvette tout en

maintenant un confinement total ou partiel tout au long de l'essai. Même si l'objectif premier est de déterminer les propriétés mécaniques du matériau, la diversité des essais de cisaillement effectués au cours de la présente étude a été planifiée également pour évaluer les influences des différents paramètres dimensionnels de l'appareil et de l'éprouvette sur les mesures obtenues.

La glace est un matériau dont le comportement est viscoplastique. Son comportement et sa résistance varient en fonction de l'intensité et de la vitesse d'application des efforts auxquels il est soumis. Les essais sont donc effectués à différentes vitesses de déformation de l'éprouvette afin d'obtenir les résistances maximales au cisaillement dans les domaines ductile, transitoire et fragile de la glace. Un bon nombre d'essai est requis pour évaluer les performances de l'appareil, c'est pourquoi les mêmes paramètres atmosphériques sont utilisés pour la formation d'un seul et même type de givre dans lequel toutes les éprouvettes sont usinées.

L'objectif, le sommaire et la spécificité de la recherche sont présentés au chapitre 1. Au chapitre suivant, la physique de la glace atmosphérique telle que la terminologie et la classification, ses modes de formation, sa microstructure et son comportement rhéologique sont abordés. Au chapitre 3, le principe de fonctionnement de l'appareil de cisaillement est décrit à l'aide d'un schéma. Ce chapitre contient également les différentes équations mathématiques utiles pour exprimer la déformation de cisaillement qui est aussi située par rapport aux autres essais de compression et de traction à l'aide des cercles de Mohr des déformations. Finalement, il se termine par la présentation du modèle énoncé pour exprimer la déformation de l'éprouvette soumise à l'essai de cisaillement. Le chapitre 4 présente le cadre expérimental dans lequel sont inclus les procédures et la description de l'appareillage utilisé. Dans les chapitres 5, 6 et 7 sont introduits respectivement les paramètres météorologiques utilisés, les diverses caractéristiques du givre formé et l'ensemble des résultats des essais de cisaillement. Le chapitre 8 est consacré particulièrement à la comparaison des résultats avec ceux d'autres études et à la modélisation du comportement de l'éprouvette par la méthode des éléments finis. Finalement, le dernier chapitre donne brièvement quelques recommandations.

## CHAPITRE 1

### CADRE DE L'ÉTUDE

#### 1.1 OBJECTIF DE LA RECHERCHE

L'eau, l'un des constituants de l'environnement atmosphérique, subit des changements d'état qui ne sont pas toujours favorables sous certaines conditions de température. Plus spécifiquement, la solidification de l'eau sur les ouvrages exposés, sous forme de givre ou verglas, est la source de bien des problèmes dans plusieurs domaines de l'ingénierie. La glace atmosphérique, qui englobe divers aspects de la solidification de l'eau, se forme sur l'ensemble des structures au cours d'une averse de pluie verglaçante ou lors du passage de nuages givrants. Dans les régions nordiques, plus particulièrement sur les lignes de transport d'électricité, les équipements de communication, les structures flottantes ou fixes en mer et dans les transports aériens, la glace occasionne des inconvénients et cause souvent des dommages sérieux dont les conséquences sont parfois dramatiques.

Sans toutefois pouvoir éviter tous les inconvénients provoqués par l'accumulation de la glace atmosphérique sur les ouvrages, il convient d'en prévenir le plus adéquatement possible les répercussions. Ainsi, outre la connaissance des différents mécanismes de formation de la glace atmosphérique, la connaissance des propriétés rhéologiques de ces types de glace est aussi essentielle aux concepteurs d'ouvrages exposés afin d'oeuvrer dans ce sens.

De façon complémentaire aux recherches déjà entreprises pour déterminer ces propriétés, ce travail vise une contribution spécifique par son étude dans le domaine du cisaillement. L'objectif de ce travail de recherche est de développer une méthode pour mesurer la résistance caractéristique de la glace atmosphérique en cisaillement pour divers taux

de déformation. Les éprouvettes de glace soumises à ces essais de cisaillement sont façonnées à partir d'échantillons formés en laboratoire dans des conditions préétablies et contrôlées.

## 1.2 SOMMAIRE DES RECHERCHES

Les études et recherches sur les propriétés rhéologiques de la glace atmosphérique ont été effectuées essentiellement au cours des quinze dernières années. Bien que des études antérieures aient porté sur la classification ainsi que sur les mécanismes de formation et de croissance des dépôts de glace atmosphérique (*Langmuir et al.*, 1946; *Rush et al.*, 1957; *Macklin*, 1962; *Kuroiwa*, 1965), les travaux reliés à l'évaluation des propriétés mécaniques de la glace atmosphérique n'ont pas été effectués de concert avec ces études et ils ne se sont principalement intensifiés qu'à partir du début des années 80. Cet essor des recherches a été pour beaucoup suscité par le développement ainsi que par l'amélioration de la fiabilité des réseaux de transport d'électricité. Diverses études axées principalement sur la caractérisation, la microstructure et la modélisation de l'accrétion de la glace atmosphérique sur les câbles et les cylindres rotatifs (*Lozowski et al.*, 1979; *Minsk*, 1980; *McComber et al.*, 1981; *Laforte et al.*, 1982; *Bain et al.*, 1983; *Makkonen et al.*, 1984), ont contribué à l'intensification de ce secteur de recherche.

Concurremment, l'évaluation des propriétés rhéologiques des divers types de glace atmosphérique a été entreprise. Ces recherches, précédées par quelques travaux sur l'adhésion du givre et du verglas sur les conducteurs électriques (*Phan et al.*, 1976; *Druez et al.*, 1978; *Laforte et al.*, 1982), ont été essentiellement effectuées par une équipe de recherche dirigée par Jacques Druez, professeur à l'Université du Québec à Chicoutimi. Tout en poursuivant les travaux de mesure de l'adhésion, ces recherches (*Druez et al.*, 1984, 1985, 1986, 1987, 1989) ont porté sur l'évaluation des comportements mécaniques en compression et en traction des différents types de glace atmosphérique.

## 1.3 SPÉCIFICITÉ DE LA RECHERCHE

Généralement, seuls des essais de traction et de compression sont effectués pour évaluer les propriétés mécaniques de la plupart des

matériaux. Toutefois, il n'est pas simple de connaître l'ensemble des propriétés mécaniques des divers types de glace atmosphérique à l'aide seulement de ces deux méthodes conventionnelles. Les formes des éprouvettes de glace atmosphérique obtenues et leurs manipulations délicates nécessitent l'emploi de méthodes complémentaires pour évaluer l'ensemble des caractéristiques mécaniques de ces matériaux.

Bien que des études aient été effectuées afin d'évaluer les comportements mécaniques en traction et en compression des divers types de glace atmosphérique, tels le givre léger, le givre lourd et le verglas, il n'existe pas de travaux portant sur l'évaluation du comportement en cisaillement de ces glaces. La connaissance de ces valeurs serait utile puisqu'elle pourrait permettre l'utilisation des modèles d'évaluation des critères de défaillance et des contraintes permises dans le domaine de la résistance des matériaux ductiles et fragiles.

Le développement d'un procédé d'essais de cisaillement approprié à cette étude nécessite l'utilisation de configurations spécifiques d'éprouvettes de glace ainsi que la conception d'un appareillage conforme. Également, l'ensemble du procédé et les éléments constitutifs doivent assurer qu'ils modifient le moins possible les propriétés du matériau de l'éprouvette. Aussi, il est impératif que le procédé ne nécessite qu'un minimum de manipulations. Finalement, les configurations d'éprouvettes qu'il est possible de façonner à partir des échantillons de glace atmosphérique formés en laboratoire sont relativement limitées et font en sorte de ne pas contribuer à la simplification du procédé.

#### 1.4 CONFIGURATION DES ÉPROUVETTES

L'utilisation des échantillons de glace formés en laboratoire est nécessaire pour déterminer les propriétés rhéologiques du givre et du verglas parce que les conditions de formation naturelles de la glace atmosphérique ne sont pas contrôlées et produisent des dépôts de glace non appropriés. Des méthodes de fabrication de la glace atmosphérique, dont tous les paramètres de formation sont connus et contrôlés, permettent d'obtenir les formes et les volumes d'échantillons dans lesquels les éprouvettes seront façonnées (*Laforte et al.*, 1982). Sommairement, la principale technique consiste à pulvériser de l'eau dans une soufflerie



réfrigérée. Lors de leur passage, les gouttelettes surfondues sont captées par un cylindre tournant, le collecteur, placé à l'intérieur de la soufflerie. Bien qu'avec cette technique il soit possible de réaliser des échantillons de glace atmosphérique plus adéquats pour les essais que ceux formés naturellement, il n'en demeure pas moins que les formes et les volumes des éprouvettes produites à partir de ces échantillons sont assez limités. L'épaisseur restreinte et la forme cylindrique de la glace accumulée sur le collecteur sont la cause de cet inconvénient difficilement contournable. Cette difficulté a été également soulevée dans la publication citée précédemment. Ainsi, les essais de chargement, adaptés pour des conditions particulières de déformation, sont effectués sur des modèles d'éprouvettes qui sont moins conventionnels que ceux usinés dans des matériaux plus faciles à produire et à manipuler, tels que les métaux, les alliages et les matières minérales.

#### 1.4.1 Essais de compression

Les études sur les propriétés mécaniques de la glace atmosphérique en compression (*Druez et al.*, 1984, 1986, 1987) s'appuient sur des essais de chargement effectués sur des éprouvettes qui sont de petit volume comparativement à celles qu'il est possible d'obtenir avec des glaces de lac ou de rivière (*Nadreau et al.*, 1987; *Kuehn et al.*, 1993). Les dimensions des éprouvettes sont de 10 x 10 x 10 mm et de 10 x 12 x 12 mm et les essais ont tous été effectués dans la direction radiale à l'axe du collecteur sur lequel la glace a été formée. En raison de limitations techniques lors de la fabrication, l'épaisseur de la glace accumulée sur le collecteur ne donne guère la possibilité de former des éprouvettes cubiques ayant des volumes supérieurs à 1 cm<sup>3</sup>. Par contre elles pourraient être plus allongées dans la direction de l'axe du collecteur. Un éventail réduit des formes et des volumes des éprouvettes ne permet pas de diversifier les essais et contribue à maintenir un degré d'incertitude non négligeable sur les comportements mécaniques observés. Dans ce sens, des travaux (*Kuehn et al.*, 1993) indiquent que, pour des éprouvettes de forme cubique variant de 1 jusqu'à 15 cm, la contrainte de rupture en compression peut décroître d'un facteur deux lorsque les essais sont effectués dans le domaine fragile de la glace d'eau fraîche. Aussi, ces travaux montrent que les conditions des appuis, la rugosité et la planéité aux extrémités des

éprouvettes, peuvent également être la cause de variation des contraintes de rupture des éprouvettes. Toutefois, dans le domaine ductile, la dimension de l'éprouvette ainsi que les conditions aux appuis n'occasionnent pas de variation sur la contrainte de rupture de ce type de glace. Il est logique de présumer que ce même comportement pourrait aussi être observé dans le cas de la glace atmosphérique.

#### 1.4.2 Essais de traction

De façon similaire, les études sur les propriétés mécaniques en traction de la glace atmosphérique (*Druez et al.*, 1987, 1989; *Tremblay*, 1991) ont été conduites en fonction des configurations des éprouvettes usinées à partir des échantillons de glace produits en laboratoire. Deux modèles d'éprouvettes ont été fabriqués. Tous deux étaient conçus de façon à ce que les propriétés mécaniques de la glace soient évaluées dans la direction parallèle à l'axe du collecteur. Le collecteur était composé de deux cylindres d'aluminium d'égale longueur, placés bout à bout.

Sur le premier type d'éprouvette, les forces de traction, appliquées aux deux extrémités du collecteur, tendent à séparer les deux cylindres qui sont maintenus joints au centre par la glace, de 10 mm d'épaisseur, qui a été formée sur leur pourtour. Le taux de déformation appliqué est déterminé par le rapport entre la vitesse de la presse et la longueur de l'éprouvette.

Les inconvénients attribuables à ce type d'éprouvette, et identifiés lors de l'étude effectuée par Tremblay (1991), proviennent de la présence du collecteur métallique à l'intérieur du cylindre de glace, pendant toute la mise en charge. Le collecteur empêche presque complètement la déformation de la glace dans la direction radiale et contribue ainsi à une augmentation significative des contraintes dans l'éprouvette. Également, l'adhésion de la glace sur le collecteur induit des contraintes qui sont non uniformes dans tout le volume de l'éprouvette et contribue ainsi à rendre difficile la détermination du taux réel de déformation. C'est pourquoi dans cette étude, des mesures de la déformation de l'éprouvette ont été effectuées à l'aide de jauges de déformation situées sur sa surface. Les résultats indiquent que la déformation est maximale au centre et décroît vers les extrémités du collecteur. Toutefois, ils n'ont pas permis de

déterminer le taux de la déformation qui est véritablement appliquée à la section de rupture de l'éprouvette.

Un second type d'éprouvette utilisé dans les essais de traction a été développé dans le cadre de l'étude de Tremblay (1991). Les particularités de ce type d'éprouvette résident dans la possibilité de faire glisser, par un mécanisme à vis, les deux cylindres formant le collecteur, de façon à libérer la partie centrale intérieure de l'éprouvette de glace. Cette partie cylindrique de l'éprouvette est usinée à une épaisseur de 8 mm sur une longueur de 40 mm. Elle est moins épaisse qu'aux extrémités de l'éprouvette afin de mieux localiser la zone de rupture. Cette configuration de l'éprouvette, schématisée dans l'étude de Tremblay (1991), permet d'éviter les inconvénients occasionnés par la présence du collecteur à l'intérieur de celle-ci lors de la mise en charge. Également, la fixation de coupes sur les extrémités de l'éprouvette devrait contribuer à limiter essentiellement sa déformation dans la zone de rupture et ainsi, permettre une meilleure évaluation du taux de déformation avec l'extensomètre et le transducteur linéaire qui ont été utilisés. Toutefois, l'étude ne donne pas d'information sur la déformation de cette zone en fonction du temps, ainsi que sur la variation de la charge appliquée dans ces différents essais. En ce qui concerne les inconvénients, l'auteur mentionne une augmentation significative des manipulations et les risques accrus de fissures accidentelles de l'éprouvette au cours de la formation. Il ne discute pas, toutefois, des manipulations et des efforts mécaniques nécessaires pour décoller et déplacer le collecteur de la partie centrale de l'éprouvette. Dans ce cas, les efforts imposés à la glace peuvent aussi occasionner la fragilisation ou générer des fissures qui pourraient être dues plus particulièrement à ces manoeuvres.

#### 1.4.3 Essai d'adhésion axiale

L'essai d'adhésion axiale, effectué au cours des travaux de Phan et al. (1976), Druez et al. (1978, 1984, 1985, 1986) et Laforte et al. (1982), consiste à mesurer l'effort axial nécessaire pour décoller la glace atmosphérique du collecteur sur lequel elle a été formée. La force est exercée sur l'éprouvette dans la direction parallèle à l'axe du collecteur. Ainsi, la force divisée par la surface de contact entre

l'éprouvette et le collecteur donne la valeur de la contrainte d'adhésion en cisaillement dans la direction axiale. Il faut voir ici une distinction entre l'adhésion axiale, qui réfère à la mesure de la force qui lie deux surfaces cylindriques, et l'adhésion de deux surfaces planes, qui peut être tangentielle ou normale.

L'appareil utilisé pour les premiers essais (*Phan et al.*, 1976), était opéré manuellement pour appliquer la charge sur l'éprouvette. C'est dans une publication ultérieure (*Druez et al.*, 1978), que ce procédé d'opération de l'appareil a été décrit. Il est mentionné que le taux de déformation était relativement constant et que le temps moyen écoulé jusqu'au décollement de l'éprouvette était d'environ vingt secondes. Bien que cette technique de fonctionnement manuel de l'essai d'adhésion ait permis de déterminer la variation de la résistance à l'adhésion en fonction de divers paramètres tels que la température et la vitesse du vent lors de la formation de la glace, sa densité, le type et la rugosité du substrat, elle ne permet pas d'évaluer cette résistance en fonction du taux de déformation. La détermination de la résistance à l'adhésion en fonction de ce paramètre permettrait de savoir s'il y a également une transition ductile-fragile lorsque la glace atmosphérique est décollée du substrat. De plus, la connaissance du taux de déformation appliqué à l'éprouvette est utile afin de permettre la comparaison des résultats obtenus lors des diverses études. Dans les autres études ultérieures, l'appareil était opéré à la vitesse de 26 mm/min à l'aide d'une presse mécanique. Cependant, conformément à un modèle de déformation qui tient compte des paramètres de fonctionnement de l'appareil et de la dimension des éprouvettes, les taux de déformation correspondants à cette vitesse n'ont pas été précisés dans ces dernières études.

Les éprouvettes utilisées au cours de ces essais étaient découpées dans la partie centrale du collecteur sans être usinées sur le diamètre extérieur. L'épaisseur radiale utilisée variait de plus ou moins 3 mm par rapport à des épaisseurs cibles de formation de la glace sur le collecteur. En fonction des diverses études, ces épaisseurs étaient de 12, 15, 19 et 22 mm. Les éprouvettes mesuraient 30 ou 50 mm suivant l'axe, et elles étaient taillées à l'aide d'un fil chaud, la dernière couche sur la face sectionnée étant enlevée à la scie afin d'éviter la variation des propriétés à

l'interface de la glace par effet thermique. La mise en charge pour l'essai d'adhésion était effectuée par l'entremise d'une plaque percée en son centre qui s'ajustait sur le pourtour du collecteur. Le jeu diamétral entre ces deux pièces était de 1,7 mm. La force d'appui de cette plaque contre une des extrémités de l'éprouvette permettait ainsi d'évaluer la résistance au glissement axial.

#### 1.4.4 Essais de cisaillement

Le principe des essais de cisaillement utilisés dans la présente étude a été élaboré en fonction d'une configuration d'éprouvette simple à produire et préalablement déterminée. De façon générale, l'essai de cisaillement s'apparente à l'essai d'adhésion puisque la même configuration d'éprouvette est utilisée. Celle-ci est également mise en charge dans la direction axiale. Toutefois, à la différence de celui utilisé dans l'essai d'adhésion, le nouvel appareil permet un confinement total ou partiel afin d'éviter les déformations de l'éprouvette qui peuvent survenir à l'extérieur de la zone de rupture. Dans l'appareil de cisaillement, l'éprouvette est rompue sur un pourtour concentrique à la surface du collecteur et suffisamment éloigné de la surface de ce dernier pour éviter les interférences attribuables à l'adhérence de la glace. Au chapitre 3, le schéma de la figure 3.1 montre le principe de fonctionnement de cet appareil. La contrainte de cisaillement est évaluée en divisant la force maximale appliquée par la surface du cylindre formé au niveau de la section de rupture.

Les éprouvettes utilisées ont été façonnées sur un tour parallèle à des épaisseurs radiales de 16,5 ou de 17,5 mm et des longueurs axiales de 8, 10 ou 12 mm. L'utilisation de plusieurs longueurs a permis de vérifier si ce paramètre a une influence sur les valeurs de la résistance au cisaillement. Quant aux épaisseurs radiales, la première a été utilisée lors des essais en confinement partiel et la seconde pour les essais en confinement total de l'éprouvette. La description des modes de confinement est donnée dans le chapitre 7.1. Finalement, plusieurs taux de déformation ont pu être appliqués sur les éprouvettes. Les appareils de mise en charge, qui sont décrits plus loin au paragraphe 4.9, permettaient une sélection variée des vitesses de mise en charge.

## CHAPITRE 2

### PHYSIQUE DE LA GLACE DE TYPE ATMOSPHERIQUE

#### 2.1 TERMINOLOGIE ET CLASSIFICATION

La glace atmosphérique est la désignation générale de tous les types de glace qui se forment à partir de la vapeur ou des gouttes d'eau qui proviennent de l'atmosphère. Son mode de formation implique un processus de croissance qui est produit, dans l'atmosphère ou sur les surfaces exposées, lors de l'accrétion de gouttes d'eau ou lors de la sublimation inverse. Les différents types de glace sont classés en trois catégories (*Kuroiwa*, 1965) qui sont déterminées uniquement sur des critères de transparence et de densité.

Le verglas désigne la glace qui est relativement translucide et a une masse volumique proche de celle de la glace d'eau pure qui est de  $0,917 \text{ g/cm}^3$ . Elle est produite lorsque la température est au point de congélation ou légèrement inférieure. La surface des dépôts est généralement lisse.

Le givre dur présente une transparence variable qui peut être de relativement claire jusqu'à opaque, tout dépendant de la quantité d'air incluse. Dans ce dernier cas elle présente une couleur blanche. La surface des dépôts est lisse, craquelée ou légèrement granuleuse. Sa masse volumique, qui varie principalement en fonction de la température de l'air et de la vitesse du vent, se situe entre  $0,6$  et  $0,9 \text{ g/cm}^3$ .

Le givre mou a une apparence blanche et opaque et sa masse volumique est inférieure à  $0,6 \text{ g/cm}^3$ . Il présente une croissance triangulaire ou en aiguilles. Dans les régions froides, les conditions favorisant sa formation sur les surfaces exposées sont les plus fréquemment réunies. Il désigne également le givre formé lors de la sublimation inverse. Ce givre est semblable à celui habituellement

remarqué en hiver sur des surfaces froides comme les vitres des fenêtres ou les pare-brise des automobiles.

Le verglas est en général produit par des grosses gouttes de pluie verglaçante, alors que le givre est produit par les gouttelettes plus fines de nuages ou de brouillard givrants.

## 2.2 MODES DE FORMATION

Diverses conditions climatiques sont observées lors de la formation des différents types de glace atmosphérique. Chacune de ces conditions peut être caractérisée par la combinaison de quatre paramètres appelés les paramètres météorologiques. Ces paramètres sont la température de l'air, la vitesse du vent, la teneur en eau liquide de l'atmosphère et le diamètre des gouttes. Que la glace soit d'origine naturelle ou qu'elle soit créée dans un laboratoire, la modification de l'un ou l'autre de ces paramètres de formation a généralement une influence directe sur son apparence et sa densité (*Laforte et al.*, 1982). Également, d'autres paramètres comme les dimensions et le matériau du substrat ainsi que le niveau d'humidité de l'air peuvent contribuer à modifier l'équilibre thermodynamique de formation et ainsi changer, de façon indirecte, les caractéristiques de la glace.

L'eau qui est contenue dans un environnement atmosphérique favorisant la formation des différentes glaces de type atmosphérique a la particularité d'être en phase liquide instable. Bien que la température de l'air dans ces conditions soit inférieure au point de congélation, l'eau, sous la forme de gouttes ou de fines gouttelettes, est dans un état de surfusion. À ces températures, qui peuvent descendre jusqu'à  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , l'eau passe relativement rapidement à la phase solide au contact d'un corps froid. La vitesse de solidification varie en fonction du bilan thermique global qui s'établit aux points de contact, lors de la croissance du dépôt de glace.

Au cours de l'accrétion des gouttes et lorsque la température est au voisinage de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , une partie de l'eau peut demeurer temporairement liquide et s'écouler sur la surface du dépôt. Dans ces conditions de formation de la glace où il y a la formation de verglas, le mode de croissance est appelé régime de croissance humide. D'autre part, lorsqu'il

y a une solidification complète de l'eau au point d'impact, la glace est dite formée en régime de croissance sèche.

### 2.2.1 Formation naturelle

Localement, les conditions nécessaires à la formation de la glace atmosphérique peuvent être réunies sur une bonne partie de la surface du globe. Elle se forme partout dans l'atmosphère à une altitude supérieure à celle de l'isotherme zéro lorsqu'il y a condensation et congélation de l'eau sur des noyaux glaçogènes. Ce processus conduit à la production d'hydrométéores et parfois de grêle. Au niveau du sol, ce sont principalement dans les régions froides ou montagneuses que les conditions propices à la formation de la glace sont retrouvées. C'est d'ailleurs en altitude, dans les montagnes, que plusieurs travaux (*Druez et al.*, 1991; *Personne*, 1988; *Kuroiwa*, 1965) sont effectués pour connaître les divers mécanismes de formation ainsi que les caractéristiques et l'intensité des accumulations.

Le verglas est formé au sol lors d'une averse de pluie verglaçante ou en présence de bruine verglaçante. Le verglas se forme généralement entre 0 °C et -4 °C, suivant la vitesse du vent et la teneur en eau de l'air, bien qu'il ait été observé à des températures plus basses. La grosseur des gouttes d'eau de pluie ou de bruine peut varier de 0,2 jusqu'à 6 mm. Pour les autres types de glace, lorsque la température se situe entre -3 et -15 °C, il y a généralement formation de givre dur ou de givre mou en présence de nuages ou de brouillard givrants. La grosseur des gouttelettes d'eau formant la bruine ou le brouillard varie entre 5 et 200 µm. Le brouillard givrant prend plutôt la forme de nuage givrant dans les régions montagneuses.

### 2.2.2 Formation en laboratoire

La formation de la glace atmosphérique en laboratoire est effectuée en recréant artificiellement, dans une enceinte, les conditions qui s'apparentent à celles qui sont retrouvées dans un milieu atmosphérique naturel. Les divers types de glace qui sont formés dans cet environnement artificiel sont similaires à ceux formés de façon naturelle. Cette similitude a été constatée lors des travaux de Laforte et al. (1982), qui ont



été effectués sur les aspects et les caractéristiques de la glace créée en laboratoire en fonction de différents paramètres de formation.

Contrairement à ce qui est observé dans des conditions atmosphériques naturelles, celles recréées dans un laboratoire peuvent être maintenues de façon relativement stable tout au cours de la durée de formation de l'échantillon de glace. Aussi, en laboratoire, il est possible d'obtenir les types de glace ainsi que des échantillons qui sont plus adéquats pour les besoins de l'étude.

### 2.2.2.1 Technique de formation

La technique la plus couramment utilisée, pour la formation de la glace atmosphérique en laboratoire, consiste à pulvériser de l'eau devant l'entrée d'une soufflerie qui est située à l'intérieur d'une enceinte réfrigérée. Lors de leur passage dans la soufflerie, plusieurs gouttelettes entrent en collision avec un obstacle qui est placé en travers de la section d'écoulement de l'air. Si elles ont eu le temps d'atteindre l'état de surfusion, les gouttelettes ainsi captées gèlent sur le substrat et forment, par agglomération, la glace atmosphérique. Le schéma suivant illustre le procédé avec l'utilisation d'une soufflerie en circuit ouvert.

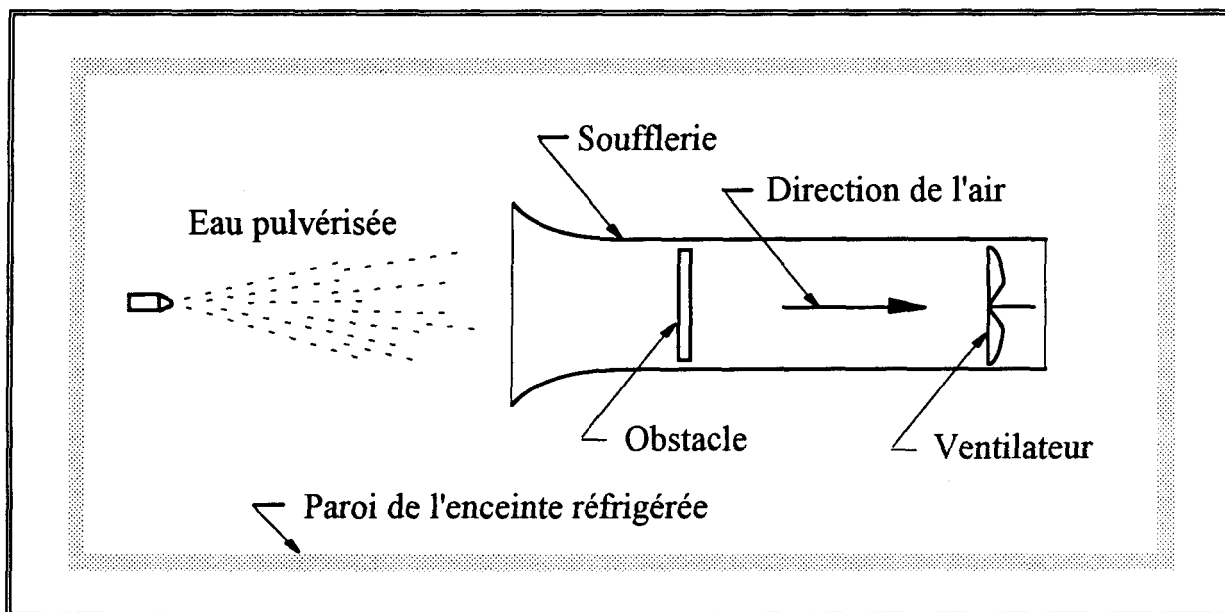


Figure 2.1: Schéma du procédé de formation de la glace atmosphérique.

Quoique d'autres façons de procéder soient utilisées pour former de la glace atmosphérique, la technique de base demeure la même. Une autre façon consiste à utiliser une soufflerie en circuit fermé dans laquelle l'air qui circule est réfrigéré. Aussi, des modèles de soufflerie en circuit ouvert ont un écoulement de l'air qui est dans la direction opposée à celle du schéma ci-dessus. Dans ce cas, où la forme de la soufflerie est différente, l'eau est vaporisée entre le ventilateur et l'obstacle. Finalement des études sur la formation du verglas et du givre ont été effectuées en utilisant une soufflerie en circuit ouvert dans un environnement naturel (*Personne*, 1988). Cette méthode de formation est utilisée dans des endroits où la présence des nuages givrants est fréquemment observée.

#### 2.2.2.2 Paramètres de formation

Au cours de la formation de la glace atmosphérique en laboratoire, chacun des quatre paramètres météorologiques doit être ajusté et maintenu de la façon la plus stable possible. Ainsi, il sera possible d'obtenir un matériau homogène et reproductible. Les nombreux essais mécaniques effectués au cours des études sur le comportement rhéologique de la glace impliquent de pouvoir disposer d'un nombre suffisant d'échantillons ayant les mêmes caractéristiques physiques.

Les paramètres météorologiques recréés en laboratoire ont des valeurs qui s'apparentent à celles retrouvées dans un environnement naturel. Quoiqu'il ne soit pas simple d'ajuster ces paramètres pour des conditions précises de formation de la glace, il est toutefois possible d'atteindre un bon résultat.

La température de l'air dans l'enceinte est évidemment le paramètre le plus simple à stabiliser, tout dépendant de la qualité de l'isolation des parois de la chambre froide et de la capacité de l'unité de réfrigération. Pour les diverses études, les températures utilisées varient généralement entre -2 et -15 °C.

La vitesse du vent, qui est simulée par la vitesse d'écoulement de l'air dans la soufflerie, présente toutefois quelques variations tout au long de la période de formation. Ces variations de vitesse, qui ont été observées au cours de cette étude, sont occasionnées par l'accumulation de la glace sur

les parois et les mécanismes de la soufflerie. Les caractéristiques de fonctionnement de la soufflerie sont décrites en détail au paragraphe 4.5 et réfèrent à des tableaux présentés à l'annexe I. La glace accumulée se détache de façon irrégulière et engendre ainsi des variations de la vitesse d'écoulement de l'air qui ne peut pas être corrigée instantanément. Toutefois, cet inconvénient ne semble pas occasionner de répercussion notable sur le degré d'homogénéité de la glace, puisque la durée de formation d'un échantillon est relativement longue. Les vitesses qui sont généralement utilisées dans les diverses études varient entre 4 et 25 mètres par seconde.

La teneur en eau de l'air est la mesure de la quantité d'eau liquide contenue dans chaque mètre cube d'air qui passe dans la soufflerie. Les teneurs en eau utilisées varient entre 0,2 et 2,5 grammes par mètre cube d'air. Finalement, le spectre diamétral des gouttes est souvent caractérisé par le diamètre volumique médian des gouttelettes qui entrent dans la soufflerie. Les diamètres volumiques médians utilisés se situent généralement entre 10 et 100 micromètres.

### 2.3 MICROSTRUCTURE DES DÉPÔTS DE GLACE

Quoiqu'il n'y ait pas de transition brutale dans les caractéristiques de la microstructure des dépôts de glace atmosphérique, des particularités observées dans la taille et l'orientation de l'axe optique des cristaux ainsi que dans les inclusions d'air sont plus spécifiques et peuvent être associées au type de régime de croissance. L'axe optique est l'axe de symétrie hexagonale du cristal de glace.

Dans le régime de croissance humide, l'axe optique des cristaux est orienté parallèlement à la surface du substrat. Lorsque la formation de la glace est effectuée en régime de croissance sèche, cet axe est perpendiculaire et descend jusqu'à 45 degrés avec la diminution de la température de l'air (*Laforte*, 1992). Généralement, en croissance humide, la forme et le contour des cristaux sont plus apparents lorsque la température de l'air  $T_a$  est près de 0 °C. Dans ce cas, les longueurs des cristaux sont pratiquement égales à l'épaisseur du dépôt de glace, contrairement à ce qui est observé en régime de croissance sèche où un

abaissement de la température entraîne une diminution de la longueur et de la largeur moyenne des cristaux et augmente la complexité de leur structure (*Laforte et al.*, 1983). La diminution de la taille des cristaux est occasionnée aussi lorsqu'il y a une augmentation de la vitesse des gouttes (*Druez et al.*, 1979; *Laforte et al.*, 1983). Toutefois cette influence a un effet moindre que celle occasionnée par la variation de la température (*Laforte et al.*, 1983). Lorsque la température de formation est près de 0 °C, la largeur moyenne des cristaux varie entre 1 et 1,5 mm. Cette largeur peut diminuer jusqu'à un facteur de 5 et elle n'est plus qu'entre 0,2 et 0,3 mm à la température de -15 °C (*Laforte et al.*, 1982). Finalement, dans cette même étude, il a été constaté que la largeur des cristaux augmente en s'éloignant de la surface du substrat. La largeur moyenne augmente jusqu'à environ 6 mm et demeure à peu près régulière au-delà de cette distance radiale.

Selon *Laforte et al.* (1983), la glace formée en régime de croissance humide est presque transparente et elle peut contenir de grosses bulles d'air qui sont à peu près sphériques. Le nombre et la dimension de ces bulles augmentent avec la teneur en eau et ce phénomène est plus évident lorsque la glace est formée avec de plus grosses gouttes. En régime de croissance sèche, deux types de bulles sont observés. Le premier type, qui est attribuable à l'air dissous dans l'eau, est formé de petites bulles qui sont localisées entre les couches de croissance du dépôt. Ces couches sont régulières et attribuables à la rotation du substrat. Elles sont d'autant plus visibles que la température de formation est basse. L'autre type consiste en de grosses bulles ayant une forme allongée et qui sont logées à l'interface des lobes qui se développent tout au long de la croissance du dépôt.

## 2.4 COMPORTEMENT RHÉOLOGIQUE

La glace, qu'elle soit de lac, de rivière ou de type atmosphérique, est un matériau pour lequel la détermination du comportement mécanique ne peut être simplifiée au même titre que pour les métaux ou les autres matières minérales dures. Contrairement à ces derniers, la glace est un matériau d'autant plus particulier qu'il se retrouve de façon générale à proximité de son point de fusion. À ces conditions, où l'équilibre

thermodynamique implique des changements de phase, s'ajoute également une structure hétérogène et anisotrope, la première étant caractérisée par la présence de défauts occasionnés par des inclusions d'air et des impuretés, et la seconde par l'orientation préférentielle de l'axe optique des cristaux. Ainsi, ces particularités et les caractéristiques physiques intrinsèques à ce matériau, ne contribuent en rien à dissocier distinctement les comportements qui sont attribuables aux propriétés fragiles ou ductiles de la glace. De façon apparente, la glace est un matériau qui présente des caractéristiques plutôt fragiles. Toutefois, lorsque les contraintes ne sont pas assez élevées, la glace a un comportement ductile et se déforme par fluage sans présenter de rupture franche (*Putot, 1987*), tout comme le ferait un liquide très visqueux. Ce comportement n'est pas particulier à la glace, il peut être également observé sur les métaux et alliages métalliques lorsque la température est au-dessus de la moitié de la température absolue de fusion du matériau (*Dorlot et al., 1986*). Tout comme la glace, ces matériaux soumis à ces conditions de température sont qualifiés de matériaux à comportement viscoplastique. Finalement, il faut signaler que la structure atomique des cristaux de glace présente une viscosité plus faible dans la direction normale à l'axe optique (*Laforte, 1992*). Un effort de cisaillement appliqué dans cette même direction induit une vitesse de déformation qui est environ deux fois plus élevée que dans celle parallèle à l'axe optique (*Mellor, 1979*).

#### 2.4.1 Propriétés mécaniques

Dans tous les domaines techniques, et particulièrement dans celui de l'ingénierie où la conception d'ouvrages nécessite une bonne connaissance des propriétés mécaniques des matériaux utilisés, la notion de résistance du matériau implique nécessairement des relations contrainte/déformation et contrainte/rupture qui sont, dans la plupart des cas, indépendantes du paramètre temps. Par contre, dans le comportement mécanique de la glace, ces relations font intervenir ce paramètre temps, puisque peu importe l'intensité de l'effort qui est appliqué à la glace il y aura inévitablement une déformation continue et finalement la rupture. Ainsi, par ces relations, il est possible d'indiquer un comportement mécanique et

également de déterminer les conditions les plus défavorables dont la connaissance est indispensable aux concepteurs d'ouvrages.

Deux modes de chargement sont principalement effectués lors des essais uniaxiaux de compression ou de traction. Une façon consiste à maintenir une contrainte constante dans l'éprouvette de glace tout au long de l'essai. La figure 2.2 indique le comportement de la glace polycristalline de lac ou de rivière lors d'un tel essai effectué par Mellor (1979). La courbe complète de la déformation, mesurée en fonction du temps, indique que le fluage de la glace s'effectue en trois phases. Dans le fluage primaire, relativement rapide et s'atténuant rapidement, est incluse la partie de la déformation due à l'élasticité de la glace. Par la suite le fluage est relativement constant jusqu'à une troisième phase où la vitesse de déformation s'accroît très rapidement jusqu'à la rupture.

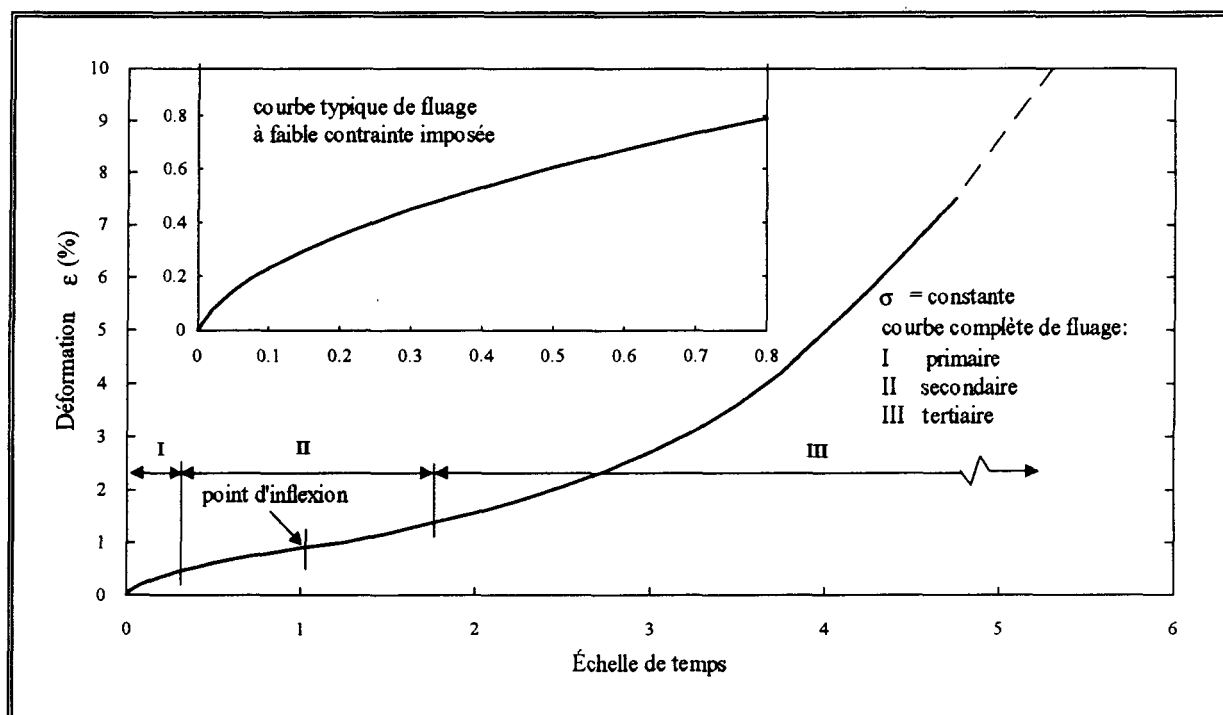
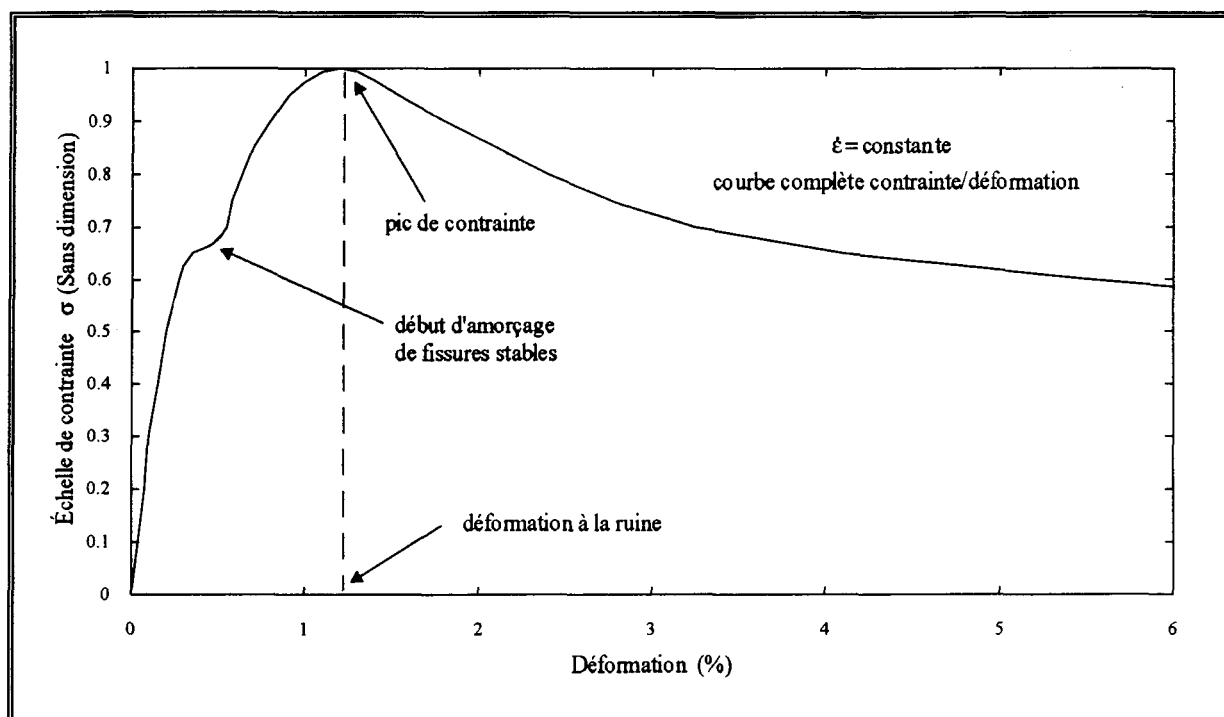


Figure 2.2: Essai à faible contrainte imposée (d'après Mellor, 1979).

La deuxième façon de procéder dans un essai uniaxial consiste à maintenir un taux de déformation  $\dot{\epsilon}$  constant. La figure 2.3 montre, avec le même type de glace que précédemment, le comportement en fonction

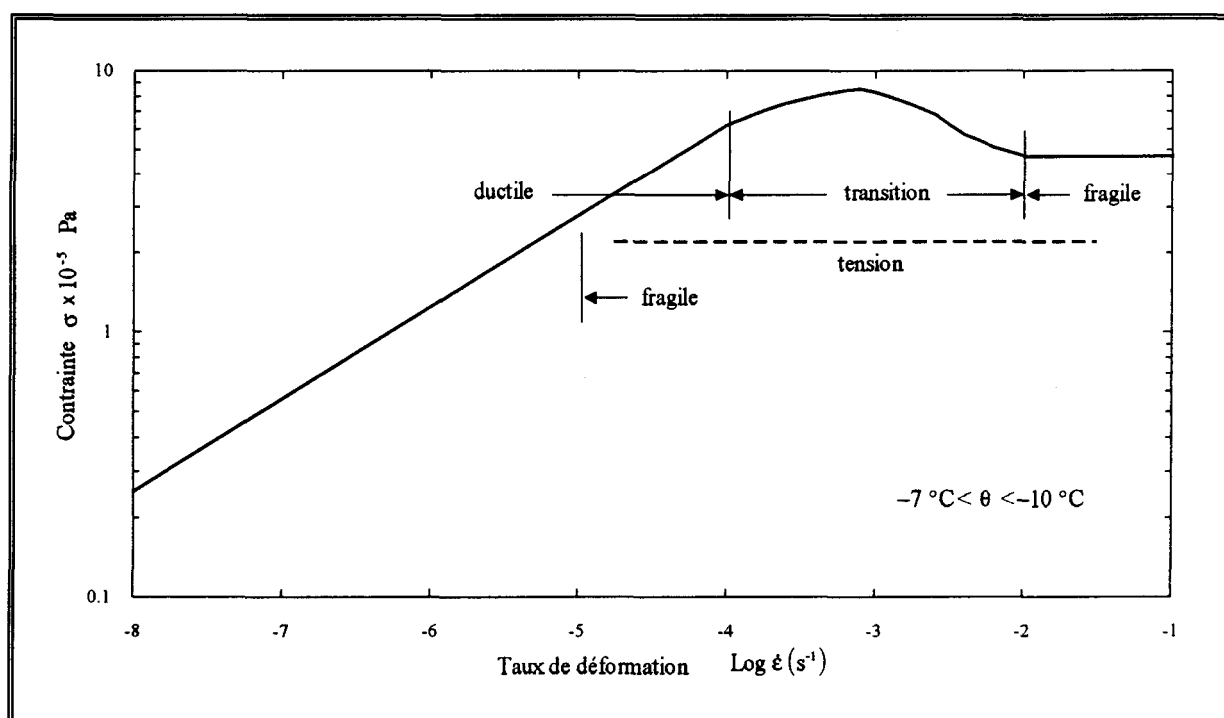
d'un taux de déformation quelconque. Le pic de contrainte observé lors de cet essai indique la limite de plasticité et représente la contrainte maximale que peu supporter le matériau durant la déformation ductile. Par la suite, la contrainte diminue jusqu'à la rupture. Les courbes des essais des figures 2.2 et 2.3 impliquent des déformations totales du matériau qui sont supérieures à 3 %. Sur la figure 2.2, le graphique à la partie supérieure indique un essai dans lequel la valeur de la contrainte imposée est très faible.



**Figure 2.3:** Essai à vitesse de déformation imposée (d'après Mellor, 1979).

Le comportement de la glace qui est observé pour des différentes vitesses de déformation se divise en trois zones distinctes. La figure 2.4 montre les courbes représentatives de la distribution des contraintes maximales, pour la compression et la traction de la glace colonnaire S2, mesurées en fonction d'une gamme étendue de taux de déformation. Dans les essais en compression représentés par un trait plein, une zone de transition est facilement observable et sépare le comportement complètement ductile de celui complètement fragile. Dans le cas du comportement en traction représenté par un trait pointillé, cette zone n'est

pas définie. Cependant, dans ce comportement, la distance entre les domaines ductile et fragile indique que la transition s'effectue très rapidement. Sur la courbe de la figure 2.4, le domaine ductile du comportement en tension se superpose à celui de la compression. La position de ces zones de transition est variable en fonction de la température (Nadreau et al., 1984). Généralement, malgré l'influence de la température et de sa microstructure, la glace présente un comportement fragile en compression pour les taux de déformation supérieurs à  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Cette limite est de  $10^{-4} \text{ s}^{-1}$  pour le comportement en traction. Également, les valeurs des contraintes maximales mesurées lors des comportements fragiles sont indépendantes du taux de déformation. Les travaux de Carter et al. (1971) ont permis de démontrer que ces contraintes variaient très peu en fonction de la température.



**Figure 2.4:** Courbe des essais uniaxiaux en compression et en traction de la glace isotrope horizontale en fonction du taux de déformation (d'après Nadreau et Michel, 1984).

De façon générale, le comportement mécanique de la glace atmosphérique est sensiblement le même que celui de la glace de lac et de rivière. Pour les différents taux de déformation en compression et en



tension appliqués à ces deux types de glace, les valeurs des contraintes maximales se situent dans le même ordre de grandeur. Tout comme pour la glace ordinaire, l'intensité des contraintes mesurées en fonction du taux de déformation de la glace atmosphérique est également maximale dans la zone de transition ductile-fragile (*Druez et al.*, 1986, 1987, 1989). Par contre, dans la zone fragile, contrairement à la glace ordinaire, les résistances en traction et en compression décroissent progressivement avec l'augmentation du taux de déformation. Toutefois, cette particularité n'a pas été observée à basse température (*Druez et al.*, 1986). La transition ductile-fragile est observée entre  $10^{-4}$  et  $10^{-2} \text{ s}^{-1}$  pour les taux de déformation en compression, et entre  $10^{-6}$  et  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  pour la traction. Également, les variations de la densité et de la taille des grains de la glace atmosphérique ont une grande influence sur sa résistance mécanique (*Laforte et al.*, 1982).

Dans la détermination des propriétés mécaniques de la glace atmosphérique, il est important de considérer que les essais mécaniques sont effectués à la même température que celle de l'air lors de la formation de la glace. Quand ce paramètre atmosphérique est modifié dans les essais, la densité et la dimension des grains sont également modifiées. Il en résulte alors un comportement qui, sans être différent, peut se démarquer de celui de la glace ordinaire. Dans le cas de la glace ordinaire, c'est plutôt le type de glace qui est étudié, sans égard à la température impliquée lors de sa formation. Pour la glace atmosphérique le comportement mécanique est évalué plus particulièrement en fonction des quatre paramètres météorologiques, en raison de leur influence importante sur la microstructure.

#### 2.4.2 Paramètres mécaniques

Exprimer le comportement mécanique d'un matériau viscoplastique comme la glace atmosphérique à l'aide de fonctions mathématiques s'avère relativement complexe et dépasse largement l'objectif de ces travaux. Toutefois, en première approximation, les relations mathématiques du domaine élastique peuvent être utilisées afin d'exprimer les différentes mesures en fonction des paramètres mécaniques étudiés. Pour que ces relations soient valables, il faut considérer que les hypothèses

d'homogénéité et d'isotropie de la théorie de l'élasticité linéaire des milieux continus s'appliquent dans le cas du matériau étudié. Pour un matériau anisotrope comme la glace, où la déformation de fluage dépasse rapidement celle de l'élasticité (*Putot, 1987*), l'utilisation de ces relations entraîne obligatoirement des erreurs dans l'évaluation des contraintes. Principalement, lors des essais dans le domaine ductile de la glace, la section initiale de l'éprouvette peut être modifiée de façon importante tout au cours d'un essai uniaxial. Dans ce cas, le calcul de la contrainte réelle serait plus approprié que celui de la contrainte nominale. Ainsi, la contrainte dans l'éprouvette peut être calculée en évaluant la nouvelle section, en tenant compte de la déformation qui correspond à la charge mesurée.

Dans un essai de traction et de compression, la relation entre la charge  $P$  et la contrainte  $\sigma$  s'exprime ainsi:

$$\sigma = \frac{P_n}{A} \quad (\text{Pa}) \quad (2.1)$$

La force  $P_n$  représente la force appliquée dans la direction normale à la section de l'éprouvette et  $A$ , l'aire de cette section.

Pour l'essai de cisaillement, l'effort  $P_p$  est appliqué dans la direction parallèle à la section. Dans ce cas, la contrainte tangentielle  $\tau$  qui en résulte en est une de cisaillement et elle est définie par la relation suivante:

$$\tau = \frac{P_p}{A} \quad (\text{Pa}) \quad (2.2)$$

La déformation relative ou unitaire du matériau résultant de l'application de la charge  $P_n$  est égale au rapport entre l'allongement et la longueur initiale  $L_i$ . Cette déformation dite normale est adimensionnelle et elle est exprimée ainsi:

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_i}{L_i} = \frac{\Delta L}{L_i} \quad (2.3)$$

$L_f$  = Longueur finale de l'éprouvette.

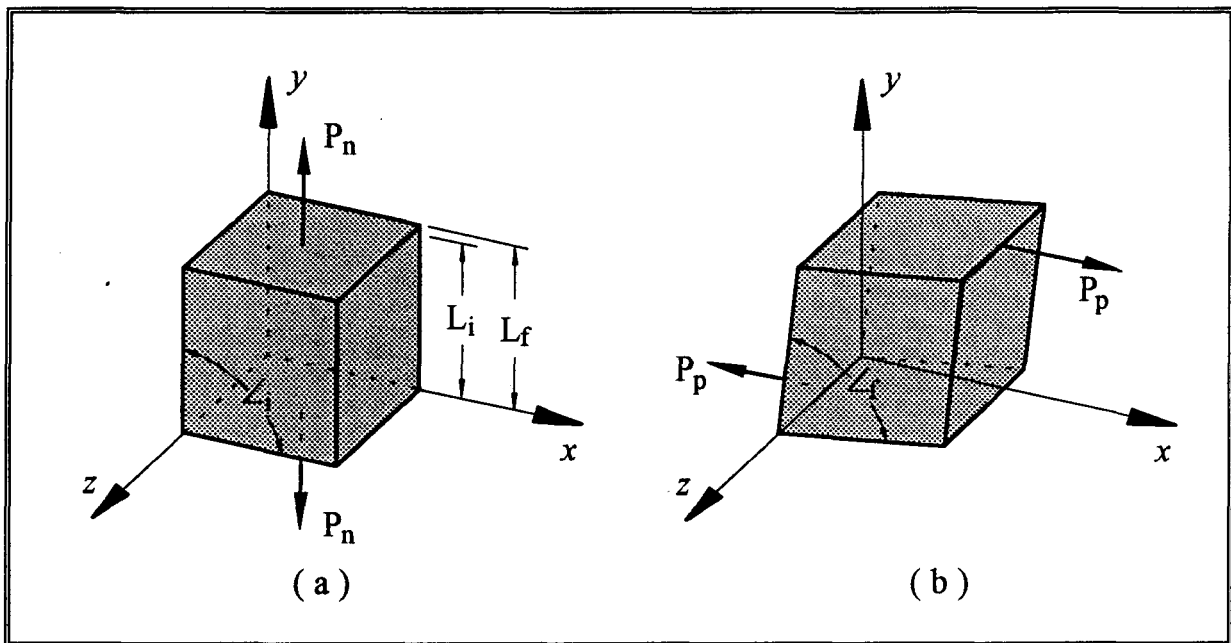
L'autre type de déformation, qui sera expliquée plus en détail au chapitre suivant, est la déformation de cisaillement  $\gamma$  qui résulte de l'application de la charge  $P_p$ . Elle représente une mesure de la déformation d'angle  $\Delta\angle$  de l'élément dans le plan de référence qui est normal à la section sur laquelle la charge est appliquée et elle est orientée dans la même direction. Cette valeur est également adimensionnelle et elle est déterminée comme suit dans le plan  $xy$ :

$$\gamma_{xy} = \text{tg}(\angle_i - \angle_f) = \text{tg } \Delta\angle \quad (2.4)$$

$\angle_i = \pi/2$ . Angle initial entre les arêtes d'un petit élément de référence cubique, délimité à l'intérieur d'un matériau non sollicité mécaniquement.

$\angle_f$  = Angle final des arêtes de cet élément dans le matériau sollicité.

Avant l'application de la charge, les arêtes de l'élément sont superposées aux axes de référence par lesquels passent les plans de déformation. La figure 2.5(a) montre cet élément lorsqu'il est déformé par la sollicitation mécanique  $P_n$  et la figure 2.5(b) lorsqu'il est déformé par celle  $P_p$ .



**Figure 2.5:** Élément de référence cubique d'un matériau sollicité mécaniquement.  
a) Sollicité par la force  $P_n$ . b) Sollicité par la force  $P_p$ .

Les relations précédentes sont indépendantes du matériau, d'autres sont rattachées au comportement du matériau et comprennent des variables telles que le module d'élasticité  $E$  (module d'Young), le module de rigidité  $G$  (module d'élasticité en cisaillement) et le coefficient de Poisson  $\nu$  qui permet de les relier. Pour un matériau isotrope dont la déformation est élastique, les relations linéaires suivantes, qui découlent de la loi de Hooke, s'appliquent pour décrire son comportement:

$$\sigma = E \varepsilon \quad (2.5)$$

$$\tau = G \gamma \quad (2.6)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.7)$$

L'équation 2.5 est valable pour un essai uniaxial et un état de contraintes planes.

Finalement, les taux de déformation normale  $\dot{\varepsilon}$  et de déformation de cisaillement  $\dot{\gamma}$  caractérisent la vitesse à laquelle le matériau est déformé. Ces valeurs sont déterminées ainsi:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (s^{-1}) \quad (2.8)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} \quad (s^{-1}) \quad (2.9)$$

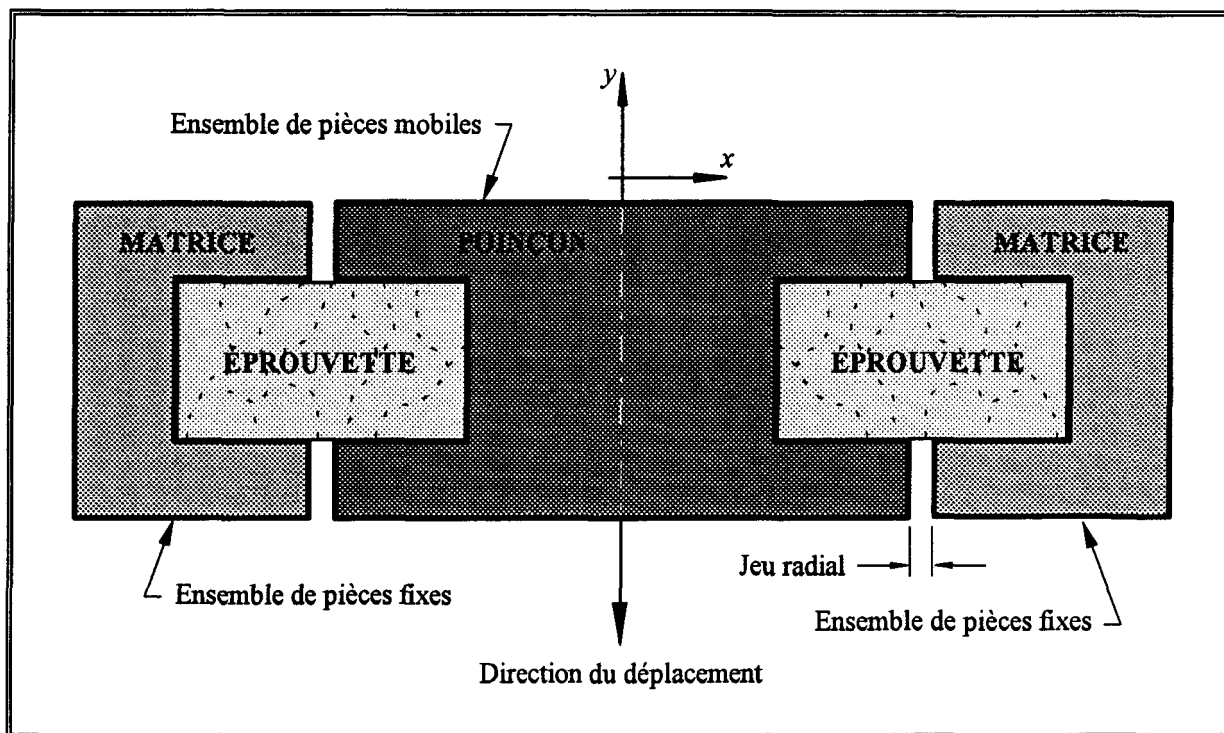
## THÉORIE ET MODÈLE DE DÉFORMATION

### 3.1 PRINCIPE DE L'ESSAI DE CISAILLEMENT

La déformation de cisaillement résulte des glissements relatifs de l'ensemble des plans parallèles d'un matériau. Par exemple, l'effort tranchant et l'effort de torsion tendent chacun à provoquer le cisaillement sur un cylindre ou une poutre. Dans ce sens et de façon très localisée, l'essai de cisaillement consiste à faire glisser l'un par rapport à l'autre deux plans contigus au sein d'un matériau. La déformation du matériau résultant de ce glissement doit être effectuée de manière à ce qu'elle soit induite uniquement par une contrainte de cisaillement et non accompagnée ou augmentée de déformations dues à des contraintes normales. Ainsi, l'objectif de l'essai de cisaillement est de recréer cet état de déformation de cisaillement pur.

Le schéma de la figure 3.1 représente, dans le plan  $xy$ , le principe de l'essai de cisaillement de la section de révolution d'une éprouvette de glace atmosphérique. Cette section est dans le plan diamétral commun à l'éprouvette, au poinçon et à la matrice. Ces deux derniers sont les deux composantes d'un appareil de cisaillement qui a été conçu spécifiquement pour ce type d'essai et qui est décrit subséquemment au paragraphe 4.8. L'assemblage des différentes composantes de cet appareil permet à la fois de transmettre à l'éprouvette les taux de déformation préétablis, tout en assurant les mêmes conditions de maintien du matériau tout au long de l'essai. Le principe s'apparente à celui du poinçonnage industriel des métaux et des autres matériaux. À ce principe s'ajoute, spécifiquement à l'appareil de cisaillement, une possibilité de confinement total ou partiel de l'éprouvette dans le but d'éviter toutes déformations ou déplacements indésirables des frontières du matériau. Il faut considérer au schéma 3.1

que l'éprouvette est de forme annulaire, ce qui permet le confinement radial. Également, la forme cylindrique des composantes de l'appareil ajoute à l'équilibre des efforts appliqués sur le pourtour de l'éprouvette.



**Figure 3.1:** Schéma du principe de fonctionnement de l'appareil de cisaillement de la glace atmosphérique.

La position de cette section de glace est identifiée par des flèches sur le plan d'assemblage de l'appareil à la figure A II.11 de l'annexe II.

La mise en charge pendant l'essai de cisaillement est effectuée jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette. Cette rupture est localisée dans l'espace libre entre le rayon extérieur du poinçon et le rayon intérieur de la matrice. Cet espace libre est identifié par le jeu radial  $J_r$  sur la figure 3.1 et sa dimension s'exprime comme suit:

$$J_r = \frac{D_m - D_p}{2} \quad (3.1)$$

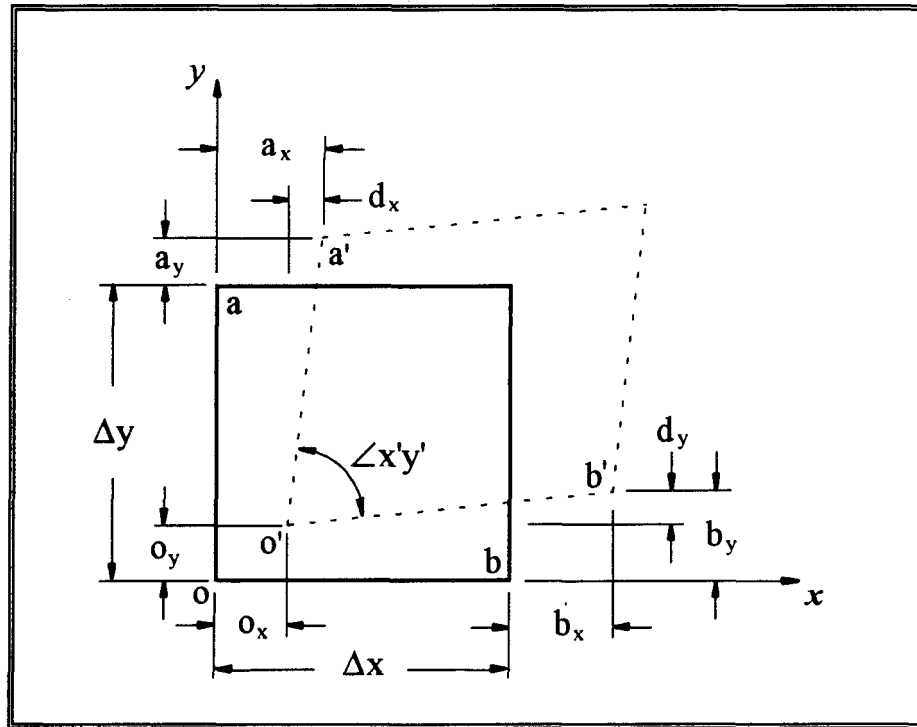
Dans laquelle:

$D_m$  = Diamètre intérieur de la matrice

$D_p$  = Diamètre extérieur du poinçon

### 3.2 DÉFORMATION DANS UN PLAN

Un matériau se déforme lorsqu'il est soumis à une charge externe. Cette déformation s'observe sous deux aspects qui sont évalués en relation avec les trois directions orthogonales du système de référence. Tel que présenté précédemment au paragraphe 2.4.2, l'une de ces déformations réfère à la variation de la longueur du matériau par rapport à sa longueur d'origine sur un des axes de référence, c'est la déformation normale  $\epsilon$ . L'autre déformation s'observe par la variation d'angle du matériau par rapport à ce même axe, c'est la déformation de cisaillement  $\gamma$ . La figure 3.2 représente la déformation d'un matériau selon ces deux modes dans le plan  $xy$ .



**Figure 3.2:** Déformations normale et de cisaillement d'un élément dans le plan  $xy$ .

Les déformations selon l'axe  $z$  sont considérées comme étant égales à zéro (état plan de déformation). Avec un élément infinitésimal, les déformations normales et de cisaillement s'expriment de la façon suivante:

$$\epsilon_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{o'b'_x - ob}{ob} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{o'b'_x - \Delta x}{\Delta x} \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_y = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{o'a'_y - oa}{oa} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{o'a'_y - \Delta y}{\Delta y} \quad (3.3)$$

$$\gamma_{xy} = \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta y \rightarrow 0}} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{2} - \angle x'y' \right) \quad (3.4)$$

Les déformations normales sont évaluées en considérant uniquement les valeurs de l'allongement par rapport aux axes de référence. À la figure 3.2, la valeur de la déformation normale selon l'abscisse est déterminée par la projection de la ligne o'b' sur cet axe. L'allongement de l'élément est évalué de la façon suivante:

$$o'b'_x = \Delta x + b_x - o_x \quad (3.5)$$

$$o'a'_y = \Delta y + a_y - o_y \quad (3.6)$$

Les variables  $b_x$  et  $a_y$  de ces équations peuvent s'exprimer également de façon plus générale en terme de dérivées partielles. Dans un but de simplification cette formulation mathématique ne sera pas utilisée. Les équations 3.2 et 3.3 se transforment ainsi:

$$\varepsilon_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta x + b_x - o_x - \Delta x}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{b_x - o_x}{\Delta x} \quad (3.7)$$

$$\varepsilon_y = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\Delta y + a_y - o_y - \Delta y}{\Delta y} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{a_y - o_y}{\Delta y} \quad (3.8)$$

Ces deux dernières équations de la déformation normale se traduisent par la variation de la longueur d'un élément divisée par sa longueur initiale.

La figure 3.3 représente plus particulièrement les déformations de l'élément de la figure 3.2. Sur cette figure les déformations normales ainsi que les angles qui sont dus à la déformation de cisaillement ont été identifiés. La valeur des angles  $\gamma_x$  et  $\gamma_y$  est déterminée comme suit:

$$\gamma_x = \operatorname{atan} \frac{d_y}{o'b'_x} \quad (3.9)$$

$$\gamma_y = \operatorname{atan} \frac{d_x}{o'a'_y} \quad (3.10)$$



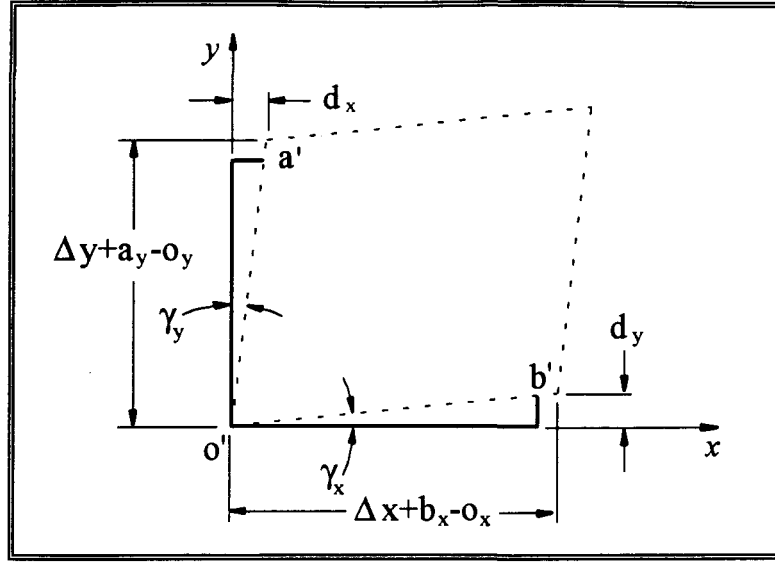


Figure 3.3: Déformations normales et de cisaillement d'un élément.

L'angle de la déformation de cisaillement est déterminé par la somme des deux angles  $\gamma_x$  et  $\gamma_y$ . L'équation 3.4 de la déformation de cisaillement devient:

$$\gamma_{xy} = \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta y \rightarrow 0}} \text{tg} \left( \text{atan} \frac{d_y}{o'b'_x} + \text{atan} \frac{d_x}{o'a'_y} \right) \quad (3.11)$$

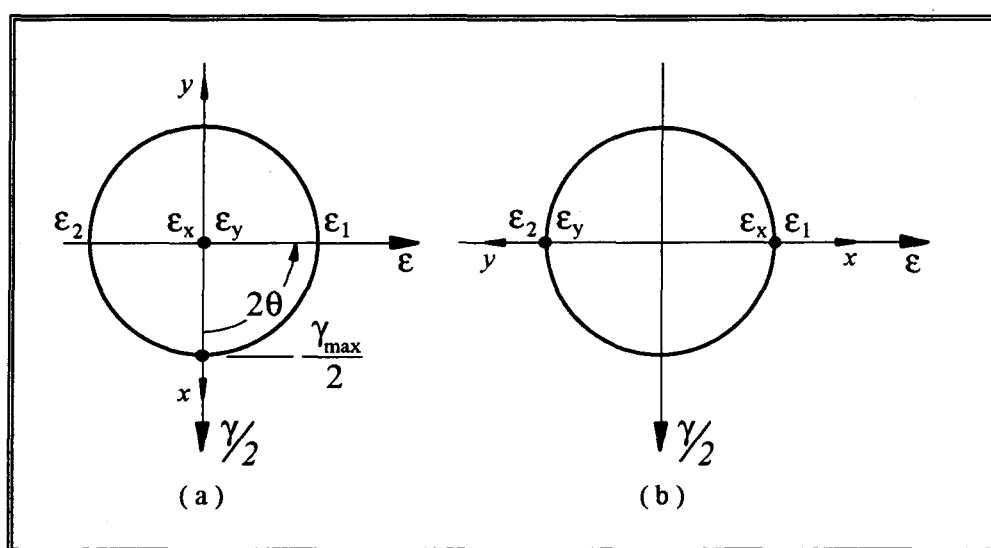
Le comportement élastique des matériaux, dans lequel on observe une proportionnalité entre les contraintes et les déformations, permet dans la plupart des cas des déformations relativement faibles. Par ailleurs, pour ces petites déformations, la valeur de la tangente et de l'angle exprimé en radians se confondent. C'est pourquoi l'équation 3.12 peut se reformuler ainsi:

$$\gamma_{xy} = \frac{d_y}{o'b'_x} + \frac{d_x}{o'a'_y} \quad (3.12)$$

### 3.3 ÉQUIVALENCE DES DÉFORMATIONS

Dans le cas où les déformations principales sont égales aux déformations normales d'un élément, le système d'axes orthogonal de référence est orienté dans la direction de ces déformations et la déformation de cisaillement sur ce système est nulle. Toutefois, dans un

matériau isotrope, les déformations principales peuvent être associées à une déformation de cisaillement équivalente. Cette équivalence signifie que l'on retrouve les mêmes déformations sur un élément s'il est orienté différemment. À l'inverse, une déformation de cisaillement peut être représentée par les effets conjugués de deux déformations normales. La figure 3.4(a) représente, à l'aide du cercle de Mohr, une déformation de cisaillement pur. La figure 3.4(b) est semblable, toutefois le système d'axes de référence  $xy$  est orienté selon les directions des déformations principales.



**Figure 3.4:** Cercle de Mohr des déformations. (a)- Pour une déformation en cisaillement pur. (b)- Pour des déformations normales égales et de signes opposés.

Lors d'une déformation de cisaillement pur, il n'y a pas dans la direction des axes de référence de déformation normale. C'est pourquoi sur le cercle de Mohr l'orientation de ces axes, identifiée par  $x$  et  $y$  sur la figure 3.4(a), est la même que celle de l'ordonnée. Ainsi, les axes principaux des déformations normales sont inclinés à un angle  $\theta = 45^\circ$  par rapport aux axes de référence  $xy$ . Cet angle est égal à  $90^\circ$ , soit  $2\theta$  sur le cercle de Mohr. La figure 3.5 présente pour cet élément, l'orientation des axes principaux des déformations qui correspond au système d'axes  $x'$  et  $y'$ . Une déformation de cisaillement pur est équivalente à des déformations normales orientées selon ce nouveau système d'axes. Dans ce cas, tel qu'il est indiqué sur la figure 3.4(b), lorsqu'il y a seulement des

déformations normales appliquées à un élément, les axes de référence de ces déformations se juxtaposent avec l'abscisse du cercle de Mohr. Pour des valeurs de déformations normales  $\epsilon_x$  et  $\epsilon_y$  égales et de signes contraires, la représentation du cercle de Mohr de la figure 3.4(b) montre bien, comme à la figure 3.4(a), un état de cisaillement pur.

Les systèmes d'axes des cercles de Mohr de la figure 3.4 n'ont pas la même orientation et il ne peut en être autrement puisque cela irait à l'encontre du principe d'unicité dans la relation entre contraintes et déformations. Il est démontré par ce principe que, pour un état donné de contraintes, il ne peut y avoir qu'un seul état de déformations.

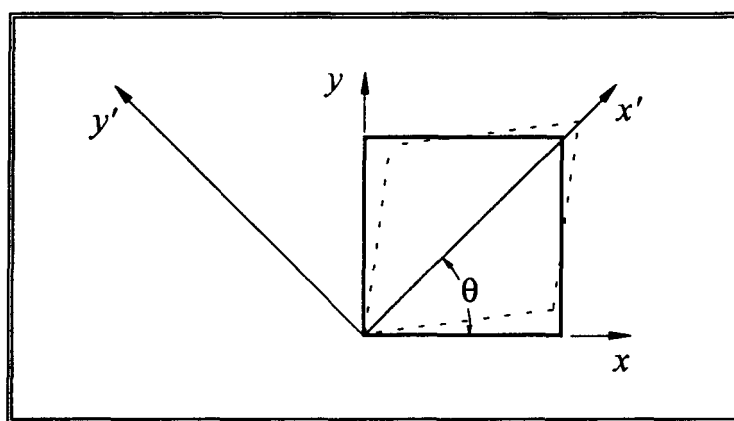


Figure 3.5: Orientation des déformations principales  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  selon respectivement les axes  $x'$  et  $y'$ .

L'angle entre l'orientation des axes de référence et celle des axes principaux des déformations normales est déterminé de la façon suivante:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \quad (3.13)$$

### 3.4 ANALYSE DES DÉFORMATIONS

Même s'il n'y a pas de lien direct entre les modes de déformation des essais de traction, de compression et de cisaillement, il est tout de même possible d'effectuer quelques évaluations comparatives pour les situer entre eux. Dans ce sens, en utilisant des relations entre les valeurs des déformations normales et de cisaillement, la superposition des cercles de Mohr des déformations permet de visualiser et de distinguer entre eux les

types d'essais. En complément, pour chacune de ces relations, l'évaluation de l'énergie de distorsion qui est induite sur le matériau peut également être utile pour différencier les modes de déformation propres à chaque type d'essai.

Lors d'un essai de traction suivant l'axe  $x$ , la relation entre les déformations normales s'exprime comme suit:

$$\epsilon_y = \epsilon_z = -\nu\epsilon_x \quad (3.14)$$

En utilisant les relations entre les déformations normales de l'équation ci-dessus, les cercles de Mohr d'un essai de traction et de compression sont tracés à la figure qui suit.

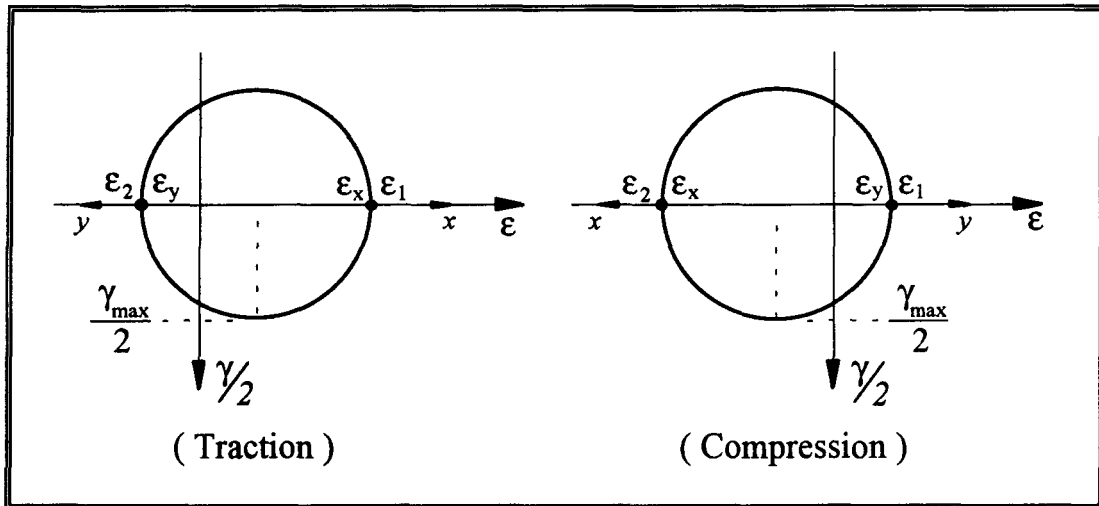


Figure 3.6: Cercles de Mohr des déformations associées à un essai de traction et à un essai de compression.

Dans ces types d'essais il n'y a pas de déformation de cisaillement appliquée à l'élément et, comme à la figure 3.4 (b), les déformations principales sont égales aux déformations normales du matériau. Le coefficient de Poisson utilisé,  $\nu = 0.33$ , est celui normalement attribué à la glace (Lavrov, 1969). La valeur de  $\epsilon_3$  n'est pas indiquée sur cette figure puisqu'elle est égale à  $\epsilon_2$  pour l'essai de traction et à  $\epsilon_1$  pour l'essai de compression. L'équation 3.15 permet d'exprimer la valeur de la déformation de cisaillement résultant des déformations axiales de l'élément soumis à ces essais:

$$\gamma_{\max} = \epsilon_1 - \epsilon_2 \quad (3.15)$$

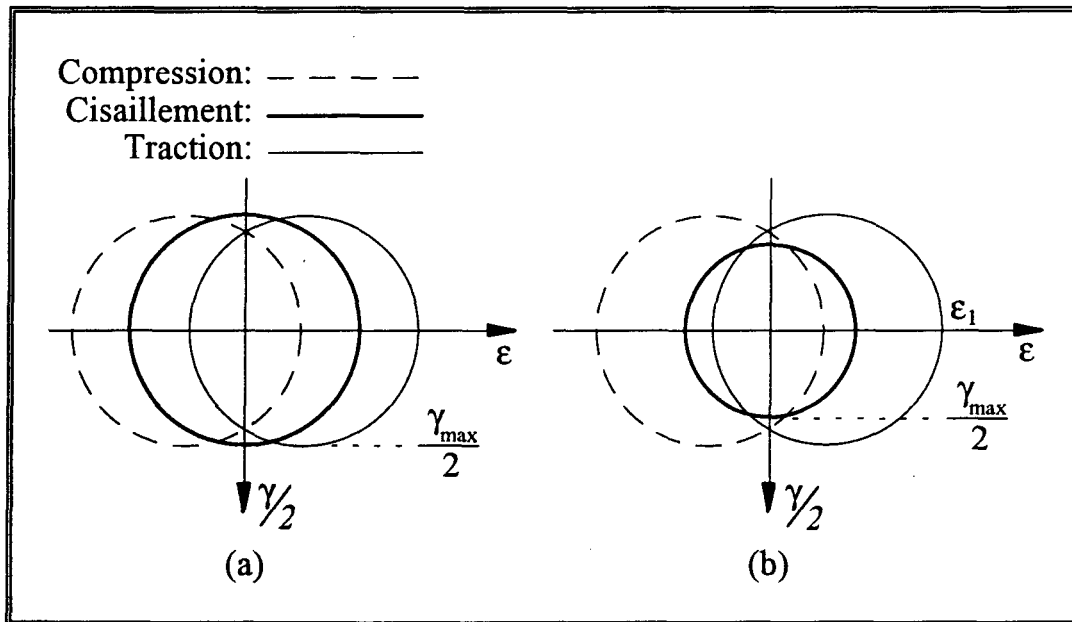
En utilisant la relation 3.14 pour substituer la valeur de  $\varepsilon_2$ , la déformation de cisaillement peut être exprimée en fonction de la déformation principale  $\varepsilon_1$ . Pour un essai de traction, la dernière équation devient:

$$\gamma_{\max} = \varepsilon_{1T}(1+\nu) \quad (3.16)$$

Également, l'état de déformation de cisaillement pur des figures 3.4(a) et 3.4(b) peut s'exprimer en fonction des déformations principales. Avec  $\varepsilon_2$  égal à  $-\varepsilon_1$  dans l'équation 3.15, cette déformation s'exprime ainsi:

$$\gamma_{\max} = 2\varepsilon_1 \quad (3.17)$$

La figure 3.7 montre la position relative des cercles de Mohr des déformations pour chacun des essais de compression, de traction et de cisaillement pur en superposant les systèmes d'axes des déformations principales. L'échelle a été respectée et la valeur de 0.33 a aussi été utilisée pour le coefficient de Poisson.



**Figure 3.7:** Superposition des cercles de Mohr pour les essais de compression, de cisaillement et de traction. (a)- Même déformation de cisaillement. (b)- Égalité entre la déformation  $\gamma_{\max}$  de l'essai de cisaillement pur et celles normales  $\varepsilon_x$ , en valeur absolue, des autres essais.

Les cercles de Mohr de la figure 3.7(a) indiquent l'ampleur relative des déformations principales lorsque les déformations de cisaillement maximales de chaque type d'essai sont égales. Dans le cas de cette égalité, la déformations principale  $\varepsilon_1$  de l'essai de traction est 1,5 fois plus grande que celle de l'essai de cisaillement. Cette valeur est le rapport entre les équations 3.17 et 3.16. D'une autre façon, lorsque la déformation  $\gamma_{\max}$  en cisaillement pur a la même valeur que la déformation normale  $\varepsilon$  de l'essai de traction (figure 3.7(b)) la superposition des cercles de Mohr montre, dans le cas du cisaillement pur, que le matériau semble moins sollicité que pour les autres types de déformation. Dans ces conditions d'égalité, le rapport est de 1,33 entre les déformations  $\gamma_{\max}$  en cisaillement des essais de traction et de compression et celle de l'essai de cisaillement pur.

La mesure de l'énergie de distorsion  $U_D$  du matériau permet d'effectuer une comparaison plus juste entre les essais de cisaillement et ceux de traction et de compression. L'équation de l'énergie de distorsion, sur lequel repose le critère d'écoulement de von Mises, s'exprime comme suit en fonction des contraintes principales:

$$U_D = \frac{1}{12G} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (3.18)$$

Dans un essai de traction,  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ . Ainsi l'énergie de distorsion pour une déformation en traction s'exprime comme suit:

$$\vec{U}_D = \frac{1}{6G} \vec{\sigma}_1^2 \quad (3.19)$$

Les flèches au-dessus des lettres ou des symboles réfèrent uniquement au type de l'essai. La flèche vers la droite indique l'essai de traction. Ci-après, la flèche vers la gauche indique l'essai de compression et celle dans les deux directions réfère à l'essai de cisaillement.

Dans un essai de compression,  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ . Dans ce cas, l'énergie de distorsion correspondant à une déformation en compression s'exprime comme suit:

$$\overleftarrow{U}_D = \frac{1}{6G} \overleftarrow{\sigma}_3^2 \quad (3.20)$$

Les essais de traction et de compression impliquent dans le matériau les mêmes valeurs des énergies de distorsion lorsque leurs contraintes principales sont égales en valeur absolue.

Finalement, dans un état plan de contraintes en cisaillement pur,  $\sigma_2 = -\sigma_1$  et  $\sigma_3 = 0$ . Alors l'énergie de distorsion d'une déformation en cisaillement vaut:

$$\vec{U}_D = \frac{1}{2G} \vec{\sigma}_1^2 \quad (3.21)$$

Comme il a été mentionné précédemment, lorsque les valeurs des déformations de cisaillement maximales sont égales entre les essais (figure 3.7(a)), la contrainte principale  $\vec{\sigma}_1$  de l'essai de traction vaut 1,5 fois celle  $\vec{\sigma}_1$  du cisaillement pur. En exprimant la valeur de l'énergie de distorsion pour une déformation de cisaillement pur en fonction de la contrainte principale  $\vec{\sigma}_1$  de l'essai de traction, l'équation précédente s'exprime ainsi:

$$\vec{U}_D = \frac{1}{2G} \left( \frac{1}{1.5} \times \vec{\sigma}_1 \right)^2 = \frac{\vec{\sigma}_1^2}{4.5 G} \quad (3.22)$$

Dans ce cas, en comparant entre elles les équations 3.22 et 3.19, la valeur de l'énergie de distorsion de cisaillement pur vaut 1,33 fois celle des deux autres modes de déformation.

Dans l'autre comparaison des valeurs des déformations, lorsqu'il y a égalité entre la valeur  $\gamma_{\max}$  du cisaillement pur et celle normale  $\epsilon_x$  de la traction (figure 3.7(b)), le rapport entre leurs contraintes principales  $\sigma_1$  est donné par l'équation suivante:

$$\frac{\vec{\sigma}_1}{\vec{\sigma}_1} = \frac{1}{2(1 + \nu)} = 0,376 \quad (3.23)$$

En utilisant cette relation pour exprimer la valeur de l'énergie de distorsion du cisaillement pur en fonction de la contrainte principale de l'essai de traction, l'équation 3.21 devient:

$$\vec{U}_D = \frac{1}{8G} \left( \frac{\vec{\sigma}_1}{1 + \nu} \right)^2 \quad (3.24)$$

En comparant également entre elles les équations 3.24 et 3.19, la valeur de l'énergie de distorsion de cisaillement pur vaut, dans ce cas, 0,424 fois celles des deux autres modes de déformation.

Il est d'usage de représenter sur un même graphique les résultats des comportements de la glace en compression et en tension. Cependant, même si le comportement du matériau est différent pour chacun de ces types d'essai, ces derniers présentent l'avantage de soumettre le matériau à la même énergie de distorsion pour des valeurs de déformations qui sont identiques. Comme il a été présenté précédemment, cette association ne peut être effectuée avec l'essai de cisaillement. Dans les deux cas d'égalités entre les valeurs des déformations qui sont présentées à la figure 3.7, les valeurs de l'énergie de distorsion du matériau soumis à l'essai de cisaillement sont différentes de celles des essais de traction et de compression. Il s'avère délicat de comparer le comportement du matériau obtenu en cisaillement avec ceux obtenus en traction et en compression puisqu'il n'y a pas de référence commune. Une comparaison graphique est quand même effectuée dans le chapitre 8 afin de montrer les similitudes entre les comportements de la glace obtenus dans les différents types d'essais. Dans cette comparaison, ce sont les taux de déformation en cisaillement qui sont utilisés en association avec les taux de déformation normale en tension et en compression. La relation entre ces taux de déformation est semblable à celle présentée à la figure 3.7(b). Le taux de déformation en cisaillement est déterminé selon le modèle présenté plus loin au chapitre 3.6.

### 3.5 SIMILITUDE DE COMPORTEMENT

Évidemment, il n'est pas simple d'obtenir des déformations semblables à celles causées par une déformation de cisaillement en appliquant en même temps des efforts en traction et en compression sur un matériau. Généralement, lors des essais de rupture d'un matériau, seuls des essais uniaxiaux de traction ou de compression sont effectués afin d'en déterminer les caractéristiques mécaniques. Ces types d'essais, comparativement à un essai de cisaillement, permettent de simplifier les diverses opérations nécessaires sur la plupart des matériaux. Dans le cas de la glace atmosphérique, des complications s'ajoutent et sont dues à la



forme des échantillons obtenus lors de la fabrication en laboratoire de la glace, ainsi qu'aux manipulations délicates de ce matériau. À ces conditions particulières s'ajoute également un comportement viscoplastique du matériau. Il devient alors préférable d'utiliser les différents types d'essais de rupture pour établir des relations entre leurs modes de déformation, qui permettront de s'assurer qu'il y a bien une corrélation dans les comportements observés. Incidemment, diverses caractéristiques comme la position de la zone de transition ductile-fragile ainsi que les niveaux relatifs des pics de contraintes entre les différents types d'essais, peuvent s'avérer révélateurs du comportement général du matériau. À cela s'ajoute la possibilité de valider ou, pour le moins, de pouvoir situer dans un ensemble les résultats obtenus lors des essais de cisaillement.

### 3.6 MODÈLE DE L'ESSAI DE CISAILLEMENT

Lors de l'essai de cisaillement, le déplacement de presque toutes les frontières de l'éprouvette de glace est connu puisqu'elle est confinée à l'intérieur des composantes du poinçon et de la matrice. Puisque la course du poinçon est faible pour atteindre la charge maximale de rupture, le déplacement des frontières de l'éprouvette est considéré semblable pour les deux modes de confinement. Ainsi, le déplacement relatif entre ces composantes est utilisé pour quantifier la déformation appliquée à l'éprouvette.

La figure suivante représente la partie de l'éprouvette qui est située entre le poinçon et la matrice de l'appareil de cisaillement du schéma de la figure 3.1. Cette partie, de largeur  $J_r$  et de hauteur égale à l'épaisseur de l'éprouvette, est déformée selon les mouvements relatifs des composantes de l'appareil. La figure montre, selon les énoncés précédents, le modèle utilisé pour exprimer la déformation de l'éprouvette de glace. Évidemment, il est considéré que la déformation est uniforme dans tout l'espace délimité par le jeu radial. Également, dans ce modèle, il est considéré que le matériau n'est pas déformé à l'extérieur des limites du jeu radial et qu'il ne subit aucune déformation normale. Ainsi, l'effort appliqué sur le poinçon occasionne seulement une contrainte de cisaillement pur dans le matériau.

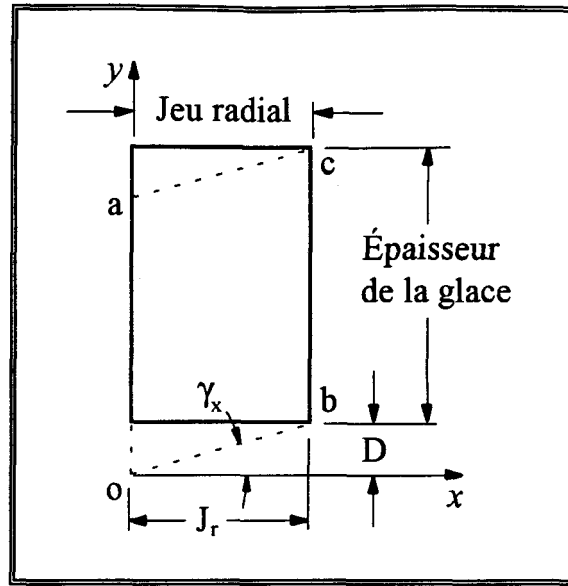


Figure 3.8: Modèle de déformation d'un élément de glace soumis à l'essai de cisaillement.

La distance  $D$  indique le déplacement vertical du poinçon à l'intérieur de la matrice. Le côté de l'élément, représenté par la droite reliant les points  $o$  et  $a$ , est situé à la limite extérieure du poinçon. Le déplacement du poinçon est unidirectionnel dans la direction de l'axe  $y$  négatif. Ce déplacement est effectué en maintenant la matrice fixe, tout comme le côté  $bc$  de l'élément qui est considéré solidaire de cette dernière et qui est situé à sa limite radiale intérieure. Ainsi, conformément à ce modèle, il n'y a aucune déformation normale mesurable, selon l'axe  $x$ , dans l'enceinte du jeu radial. Le rapport entre le déplacement  $D$  du poinçon en fonction du temps  $\Delta t$  et la largeur du jeu radial  $J_r$  sont utilisés pour représenter la valeur du taux de déformation de cisaillement qui est appliqué à l'élément. Cette valeur du taux de déformation de cisaillement s'exprime comme suit:

$$\dot{\gamma} = \frac{D}{\Delta t J_r} \quad (\text{s}^{-1}) \quad (3.25)$$

Lorsque le jeu radial  $J_r$  de l'équation tend vers zéro, la valeur de la déformation de cisaillement tend vers une valeur infinie. Il faut en conclure que le modèle ne rend pas compte parfaitement du comportement réel du matériau. Le fait de considérer que les déformations de l'élément sont localisées seulement à l'intérieur des limites du jeu n'est pas

approprié. Les matériaux sont compressibles et à toutes actions inscrites aux limites internes du jeu doit obligatoirement correspondre une réaction aux limites externes. Il en résulte un équilibre des forces qui ne permet pas, comme dans ce modèle, de délimiter et de localiser parfaitement la déformation de cisaillement. Cependant, il est possible d'exprimer les résultats des essais en fonction de la déformation de cisaillement en utilisant un jeu qui permet un minimum de dégagement entre le poinçon et la matrice. Il faut cependant qu'il soit assez limité pour éviter que le matériau soumis à l'essai soit déformé trop fortement en flexion. Également, en se guidant sur les caractéristiques de fonctionnement des poinçons et matrices avec d'autres matériaux (*Kaczmarek*, 1964; *Schey*, 1964), l'épaisseur de la glace doit être comprise entre 20 et 100 fois la largeur du jeu radial.

## *CHAPITRE 4*

### **PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE ET APPAREILLAGE**

#### **4.1 CADRE DES EXPÉRIMENTATIONS**

Les travaux de cette étude ont été réalisés avec les équipements de l'Équipe de Recherche en Ingénierie du Givrage des Structures ( ÉRIGS ), dont les laboratoires sont situés à l'Université du Québec à Chicoutimi. Cette équipe est dirigée par Jacques Druez, professeur à cette même université.

#### **4.2 ENVIRONNEMENT ET MANIPULATIONS**

Principalement, dans l'élaboration de la banque de données, la procédure conduisant à la sortie des résultats pour au plus 6 essais de cisaillement se divise en quatre étapes distinctes qui sont la fabrication de l'échantillon de glace, le façonnage des éprouvettes, la mise en charge des éprouvettes et la mise en forme des résultats. Cette procédure peut prendre entre 2 et 7 jours, tout dépendant de la durée de chaque essai de cisaillement.

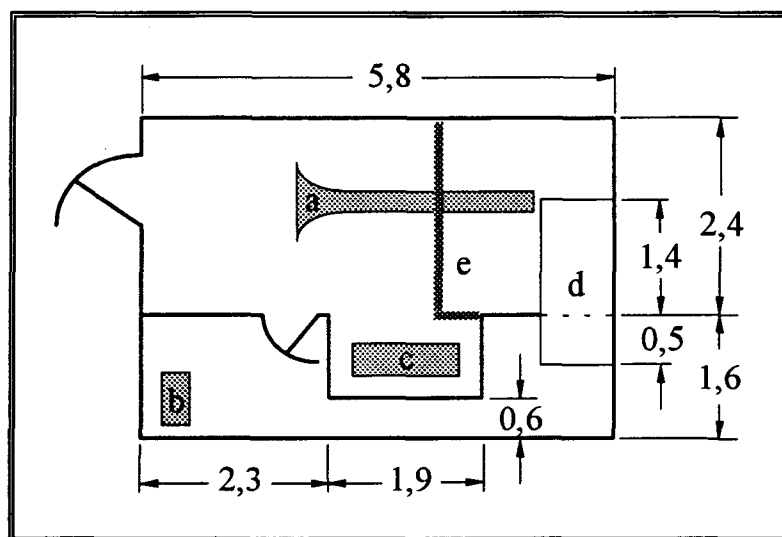
Afin d'éviter toute modification des caractéristiques de la glace, aucune manipulation directe de la glace ou des pièces en contact avec elle n'est effectuée à mains nues. Également, pour ne pas qu'il y ait de sublimation pendant les délais nécessaires au cours des diverses manipulations, la glace est recouverte d'un plastique et elle est remise, au besoin, dans un contenant en polystyrène.

La figure A II.1 de l'annexe II montre le schéma de l'appareillage et des systèmes d'acquisition et de contrôle utilisés tout au cours de cette étude. Les traits discontinus indiquent les différents paramètres qui sont

enregistrés par le système informatique lors de la formation de l'échantillon de glace ou lors de l'essai de cisaillement.

### 4.3 ÉQUIPEMENTS RÉFRIGÉRÉS

La chambre froide contient tous les équipements utiles à la fabrication de la glace atmosphérique, au façonnage des éprouvettes et à leur mise en charge. Le regroupement des appareils dans une même enceinte permet d'effectuer les diverses opérations dans les mêmes conditions de température tout en contribuant à minimiser les manipulations. La figure ci-dessous représente la disposition des équipements ainsi que les dimensions intérieures de la chambre froide exprimées en mètres. Les dimensions extérieures sont  $6,1 \times 4,3 \times 3,3$  mètres.



**Figure 4.1:** Dimensions de la chambre froide et disposition des appareils. a) Soufflerie. b) Presse. c) Tour parallèle. d) Échangeur de chaleur. e) Rideau en treillis.

Des températures jusqu'à  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  peuvent être maintenues avec un contrôle électronique relié à un thermocouple. Les écarts maximums de température sont de  $\pm 1$  degré. Généralement un délai d'attente d'environ 2 heures est nécessaire afin d'atteindre l'uniformisation de la température des appareils et des différentes composantes intérieures de la chambre.

Outre le collecteur et l'appareil de cisaillement, qui ont été spécifiquement conçus pour les besoins de cette étude, une soufflerie en circuit ouvert, un tour parallèle ainsi qu'une presse à déplacement par vis sont les trois principaux équipements d'importance utilisés dans la chambre froide.

#### 4.4 GOUTTELETTES SURFONDUES

Une phase liquide instable peut être observée lorsque l'eau est sous la forme de gouttes ou de fines gouttelettes et que la température de l'air est inférieure au point de congélation. Dans ces conditions, l'eau est en état de surfusion et les gouttelettes sont dites surfondues. À ces températures, les gouttelettes passent relativement rapidement à la phase solide au contact d'un corps froid et forment, par croissance du dépôt, de la glace de type atmosphérique.

##### 4.4.1 Principe de formation

Les gouttelettes sont formées dans la chambre froide à l'aide d'une buse de pulvérisation. Le principe de formation des gouttelettes consiste à expulser en même temps, à travers l'orifice de la buse, de l'eau sous pression et de l'air comprimé. Ainsi, l'air en se dilatant disperse l'eau en une multitude de gouttelettes plus ou moins fines qui forment un brouillard qui est entraîné dans la soufflerie.

La distance ajustée entre la buse et l'axe du collecteur est de 2,16 mètres. Cette distance est suffisante pour permettre aux gouttelettes d'atteindre l'équilibre dynamique et thermodynamique avec la vitesse et la température de l'air dans la soufflerie. À ce sujet, plusieurs études font référence aux travaux de Phan et al. (1976). Dans ces travaux, des conditions plus défavorables, telles une distance inférieure et une vitesse de l'air supérieure à celles utilisées dans la présente étude, permettaient d'atteindre cet équilibre.

##### 4.4.2 Circuits d'alimentation

La figure A II.2 montre le schéma des circuits d'alimentation en air et en eau de la buse de pulvérisation. La pression de l'air et le débit d'eau sont fixés en fonction des paramètres atmosphériques, teneur en eau de

l'air et diamètre volumique médian des gouttes, utilisés pour la formation de la glace.

L'air, qui est maintenu à une pression constante à l'aide d'un régulateur de pression, est acheminé directement à la buse. Le régulateur est ajusté à l'aide d'un manomètre à  $152 \pm 5$  kPa. Également, une pression d'air de 35 kPa est maintenue à l'intérieur du réservoir d'eau pour permettre une meilleure dilatation du conduit de silicone de la pompe péristaltique.

L'eau du robinet utilisée a un pH de 7,4 à 21 °C après l'ajout de 10 gouttes de chlore à 6% dans le réservoir. Le chlore est ajouté pour assurer la conservation de l'eau dans le réservoir, les conduits et la pompe entre les utilisations. L'eau est préalablement filtrée avant d'être admise dans le réservoir où elle a une température d'environ 10 °C lorsqu'elle est utilisée. Le réservoir a une capacité de 20 litres.

La pompe péristaltique est ajustée, à l'aide du débitmètre, à un débit de  $48 \pm 0,5$  ml/min. La pompe est du modèle *Digi-Staltic* n° 7522-10. La pression d'équilibre de l'eau, qui s'établit en fonction du débit d'eau et de la pression d'air utilisée, est de  $122 \pm 5$  kPa. Cet équilibre entre les deux pressions dépend également de la configuration de la buse utilisée.

La buse est fabriquée par *Spraying Systems Co.*. Les composantes, *fluid cap* n° 2050 SS et *air cap* n° 67147 SS sont assemblées sur un support de modèle 1/4 J. Les conduits d'alimentation sont flexibles et de type *Tygon/R3603*. Également, la buse ainsi que la partie des conduits d'alimentation qui sont à l'intérieur de la chambre froide sont recouverts d'un câble chauffant et d'un matériau isolant. Toutefois, au cours de cette étude, il n'a pas été nécessaire de faire fonctionner l'élément électrique du câble, la température utilisée dans la chambre froide n'étant pas suffisamment basse pour occasionner des problèmes dus à la formation de glace dans le conduit d'eau et dans la buse.

Finalement, lors de la mise en fonction du système d'alimentation, le conduit d'eau est manipulé de façon à expulser l'air emprisonné. Une période de fonctionnement de la buse d'environ 5 minutes est nécessaire

pour stabiliser le débit d'eau et atteindre l'équilibre entre les pressions d'air et d'eau.

#### 4.5 SOUFFLERIE

La soufflerie permet de simuler la vitesse du vent lors de la formation de la glace atmosphérique. Près de l'entrée de la soufflerie, la circulation de l'air entraîne les gouttelettes qui, si elles n'entrent pas en collision avec le collecteur, se congèlent sur les parois, sur les pales des ventilateurs ou sur les ailettes restrictives. L'air circulant à l'extérieur de la soufflerie en circuit ouvert est ainsi toujours exempt de gouttelettes en suspension. Également, comme indiqué sur la figure 4.1, un rideau en treillis de nylon, semblable à une moustiquaire, sépare la chambre froide de façon transversale à la soufflerie. Ce rideau, qui isole d'une certaine manière l'arrière de l'avant de la soufflerie, permet un meilleur écoulement de l'air dans la chambre froide. Il permet aussi de retenir les fines particules de glace qui sont expulsées de la soufflerie. Celles-ci sont produites lorsque des accumulations de glace se détachent et sont brisées par les pales des ventilateurs.

##### 4.5.1 Description générale

La soufflerie est fabriquée par la compagnie *Hoods of Colchester Ltd.*. Sa longueur est de 292 cm et, tel que montré sur le schéma de la figure A II.1 de l'annexe II, la partie avant de la soufflerie est un convergent carré et convexe afin de faciliter l'admission de l'air et d'éliminer le plus possible la turbulence. La section d'essais, dans laquelle le collecteur est situé, a une section de  $23 \times 23$  cm et une longueur de 46 cm. L'axe du collecteur est situé à 88 cm de l'avant de la soufflerie. À l'arrière, les 2 ventilateurs, qui tournent en sens contraires à la vitesse de 3400 tours par minute, et les 2 ailettes restrictives orientables, permettent d'obtenir les diverses vitesses de l'air au niveau de la section d'essais.

##### 4.5.2 Caractéristiques de fonctionnement

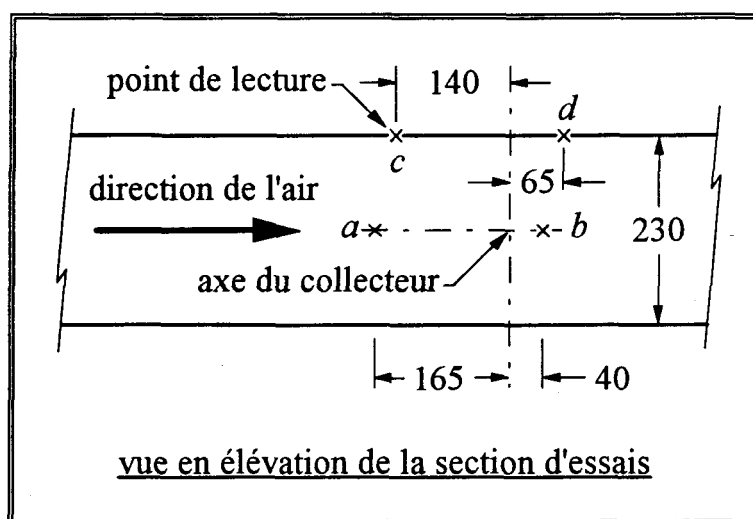
Des vitesses de 3,9 à 21,2 m/s peuvent être obtenues dans la section d'essais. Toutefois, ces vitesses limites peuvent être plus faibles en raison



des accumulations de glace sur les parties intérieures de la soufflerie. Une accumulation de la glace sur les pales et sur les parois occasionne à la fois une diminution de la performance des ventilateurs et une obstruction qui modifie les caractéristiques de l'écoulement de l'air. Dans ces conditions, lorsqu'il n'y a pas de correction de l'orientation des ailettes restrictives, il en résulte une baisse graduelle de la vitesse de l'air. La vitesse diminue jusqu'à ce que, par effet d'entraînement, une partie de la glace se détache et occasionne un saut brusque de la vitesse. Ce décollement de la glace est observé plusieurs fois lors de la formation d'un échantillon de glace. Également observée lors des travaux de Personne (1988), la formation de la glace sur les parois de la soufflerie occasionnait des variations brusques d'environ 2 m/s de la vitesse de l'air.

#### 4.5.3 Mesure de la vitesse de l'air

Des mesures de la vitesse de l'air, avec un tube de Pitot et un manomètre à niveau d'huile, ont été effectuées en plusieurs points de la section d'essais pour évaluer l'uniformité de l'écoulement de l'air. La figure 4.2 indique la position des quatre points où, sans la présence d'un collecteur, les vitesses de l'air ont été mesurées pour 16 positions différentes des ailettes restrictives. Le tableau A I.1 de l'annexe I présente les valeurs obtenues. Ces mesures ont été effectuées à 20 °C.



**Figure 4.2:** Emplacement des points de lecture de la vitesse de l'air dans la section d'accès (Les dimensions sont exprimées en mm).

L'équation d'équilibre entre les énergies cinétique et potentielle permet de connaître la vitesse dans la soufflerie. Après transformation de cette équation, la vitesse qui est calculée à partir de la hauteur d'eau indiquée sur l'échelle du manomètre s'exprime comme suit:

$$v = \left( \frac{2 \times g \times h \times \rho_e}{\rho_a} \right)^{1/2} \quad (4.1)$$

Dans laquelle,  $h$  = hauteur d'eau, (m)

$\rho_a$  = masse volumique de l'air ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_e$  = masse volumique de l'eau ( $\text{kg/m}^3$ )

Les données inscrites dans le tableau A I.1 indiquent que la vitesse n'est pas constante dans la section d'essais de la soufflerie. Sur 205 mm, entre les points  $a$  et  $b$ , elle augmente de 2,3% en moyenne par rapport à l'ensemble des positions d'ouverture des ailettes. Cette augmentation est de 5,7% entre les points  $c$  et  $d$  situés sur la paroi supérieure. Sur cette paroi, au point  $c$ , la moyenne des vitesses est inférieure de 2,5% par rapport à celle au point  $a$  situé sur l'axe longitudinal de la soufflerie.

Le tableau A I.2 présente les valeurs des vitesses obtenues sur un axe vertical passant par le point  $a$ , pour quatre collecteurs de diamètres différents placés dans la section d'essais. La position de ces points est identifiée par des lettres sur la figure A II.3. Cette figure présente également, pour d'autres points, les valeurs des vitesses de l'air lorsqu'un collecteur d'un diamètre de 30,4 mm est en place dans la soufflerie.

À l'inverse de précédemment, pour les 4 collecteurs, la moyenne des vitesses au point  $c$  est cependant supérieure de 1,5% par rapport à celle au point  $a$ . Ces moyennes n'ont été par contre déterminées que pour une seule vitesse de 14,5 m/s, qui a été préalablement ajustée au point  $a$  sans la présence d'un collecteur dans la section d'essais. Ainsi, l'insertion du collecteur dans la soufflerie modifie la vitesse de façon relativement importante. Elle demeure toutefois uniforme à  $\pm 1,5\%$  sur un axe vertical situé à 165 mm devant celui de chacun des 4 collecteurs placés dans la section d'essais. Par contre, sur cet axe, par rapport à la vitesse de 14,5 m/s qui a été préalablement ajustée au point  $a$ , la vitesse de l'air chute de 4% en moyenne lorsque les collecteurs sont placés dans la section

d'essais. De façon similaire, les valeurs relevées sur un axe longitudinal situé à 25 mm de la surface du collecteur de 30,4 mm de diamètre, figure A II.3, indiquent également une chute de la vitesse de l'air. Cette chute, qui est de 16,6%, représente une baisse de la vitesse de près 2,5 m/s par rapport à la vitesse initiale de 14,5 m/s.

En tenant compte du profil des vitesses de l'air de ce type de soufflerie, il est difficile d'obtenir une vitesse d'approche du collecteur qui soit constante et régulière. Cette vitesse est encore plus difficile à fixer si les variations occasionnées par la formation de la glace sont considérées. Toutefois, il serait possible de déterminer pour quelle distance en avant de l'axe du collecteur la vitesse est maximale et le plus uniforme sur toute une section transversale. Cette section pourrait alors être utilisée comme position de référence pour l'ajustement des paramètres atmosphériques dans la soufflerie. Cependant, les relevés qui ont été effectués au cours de cette étude ne permettent pas de déterminer la position de cette section, un plus grand éventail de points de mesure de la vitesse étant nécessaire. Ces travaux nécessiteraient également la présence d'un plus grand nombre de trous d'accès sur les parois de la soufflerie pour positionner le tube de Pitot aux différents points de lecture.

Finalement, faute d'une étude plus exhaustive et en considérant que les paramètres atmosphériques de la teneur en eau et du diamètre des gouttes sont mesurés sans la présence du collecteur, la vitesse de l'air a également été ajustée dans cette condition. De la sorte, l'ajustement de la vitesse de l'air est effectué par rapport à sa valeur relevée à la distance de 165 mm de l'axe du collecteur.

#### 4.5.4 Contrôle de la vitesse de l'air

Les ventilateurs sont situés à l'arrière de la section d'essais de la soufflerie si l'on considère la direction d'écoulement de l'air. Ce positionnement de l'élément moteur par rapport à la plus grande partie du conduit de la soufflerie fait en sorte que l'écoulement de l'air s'effectue en pression relative négative. Cette pression relative est la pression statique de l'air dans la soufflerie. Ce mode de fonctionnement de la soufflerie implique qu'en tout point de la section d'essais correspond une pression

dynamique de l'air qui est égale à la valeur absolue de la pression statique. L'utilisation d'un manomètre électronique, dont la précision est de  $\pm 7 \mu\text{m}$  de hauteur d'eau, n'a pas permis de mesurer une variation de la pression lorsque uniquement le branchement servant à la lecture de la pression dynamique est relié au tube de Pitot. D'une façon similaire, il n'y a aucune variation de la lecture sur le manomètre lorsque ce branchement est interrompu. Dans ces conditions, la pression statique mesurée directement sur la paroi de la soufflerie peut être utilisée pour déterminer la vitesse de l'air.

Tel qu'indiqué sur le schéma de l'appareillage de la figure A II.1, un capteur de la pression statique a été relié à la soufflerie à l'emplacement indiqué par le point *c* de la figure 4.2. Ainsi, il a été possible, à l'aide d'un système informatique, d'enregistrer la variation de la vitesse de l'air tout au cours de la formation de la glace sur le collecteur. Également, la fabrication d'un relais et d'un mécanisme de commande des ailettes a été nécessaire pour contrôler la vitesse de l'air par ordinateur. Enfin, pour tenir compte de l'écart observé entre les vitesses de l'air mesurées au point *c* et celles mesurées sur l'axe vertical passant par le point *a*, une majoration de 3% de la vitesse a été effectuée au cours de l'acquisition des données.

Tel que mentionné au paragraphe 4.5.2, la vitesse de l'air varie lorsqu'il y a formation ou décollement de glace à l'intérieur de la soufflerie. La figure A II.4 est composée de quatre graphiques qui sont représentatifs des variations de la vitesse de l'air dans les différents modes de fonctionnement de la soufflerie.

Des augmentations brusques de la vitesse sont enregistrées lorsqu'il y a un décollement de la glace accumulée sur les parois et les pales des ventilateurs de la soufflerie. Lors d'un décollement, les écarts de vitesse atteignent près de 5 m/s pour une vitesse cible de 16 m/s et ils sont facilement identifiables sur le premier et le troisième graphique de la figure A II.4. Généralement, sans intervention pour contrecarrer la formation de la glace dans la soufflerie, un premier décollement d'importance est observé entre les 15 et 20 premières minutes. Par la suite les décollements occasionnent des variations moins prononcées de la

vitesse de l'air. Le premier graphique montre le comportement de la vitesse dans le mode conventionnel d'utilisation de la soufflerie. Ce mode consiste, après l'ajustement initial sur la vitesse cible, à laisser fixe l'ouverture des ailettes tout au long de la formation de l'échantillon de glace. Dans ces conditions de formation de la glace, avec les autres paramètres atmosphériques qui sont donnés au chapitre 5, la vitesse moyenne est inférieure de 2,4 m/s par rapport à la vitesse cible. Cette diminution équivaut à une baisse de 15%.

L'utilisation d'un produit antigivrant *Kilfrost K.A.I.P. type B* sur les pales des ventilateurs et les parois de la section d'essais, rend la vitesse plus régulière. Cependant, elle diminue constamment jusqu'à 14,5 m/s après 80 minutes de fonctionnement. Cette diminution est principalement occasionnée par la formation de glace sur les pales des ventilateurs où l'élimination du produit antigivrant est plus rapide. L'utilisation d'un produit antigivrant, combinée à l'asservissement de la position des ailettes, permettrait de mieux régulariser la vitesse. Dans cette optique, la soufflerie devrait être modifiée afin de rendre plus accessibles les pales des ventilateurs.

Le troisième graphique de la figure A II.4 montre les variations de la vitesse de l'air lorsque l'ordinateur modifie la position des ailettes pour corriger la vitesse de l'air. L'asservissement de la position des ailettes tout au cours de la formation de la glace nécessite un certain délai lors du décollement de la glace et permet de maintenir la vitesse moyenne de l'air à  $\pm 0,2$  m/s de la vitesse cible. Dans ce mode de fonctionnement, l'écart type autour de la vitesse cible est de 0,7 m/s, soit 0,1 m/s de moins qu'en mode conventionnel présenté précédemment. Lorsqu'un déglçage mécanique est effectué de concert avec l'asservissement, l'écart type de la vitesse diminue à 0,5 m/s. Le quatrième graphique montre les variations de la vitesse de l'air dans ce mode de fonctionnement. Le déglçage mécanique consiste à effectuer à toutes les 10 à 15 minutes un décollement partiel de la glace en passant rapidement une tige sur le pourtour intérieur avant de la section d'essais. Tout en contribuant à garder libre la surface avant de la section d'essais, cette manoeuvre

provoque par effet d'entraînement le décollement de la glace accumulée sur les parois arrières, les pales des ventilateurs et les ailettes restrictives.

Finalement, les petites variations sur les graphiques sont attribuables à un bruit qui est généré par l'instrumentation. La lecture de la pression statique est effectuée à chaque seconde par le système informatique et, pour donner une meilleure image de la vitesse réelle de l'air, chaque point de la courbe représente la valeur moyenne sur 5 secondes.

D'autres améliorations pourraient être apportées à l'installation pour augmenter la qualité des mesures de la vitesse ainsi que le contrôle de l'orientation des ailettes. La source de tension électrique qui alimente le capteur de la pression statique n'est pas suffisamment constante. De plus, du fait de la grande sensibilité de ce capteur, un support indépendant, autre que celui du mur extérieur de la chambre froide, pourrait être utilisé afin d'éviter que des vibrations soient transmises au corps de l'appareil. Également, pour faire office de condensateur, un réservoir pourrait être intercalé sur chacun des 2 tubes, le plus près possible des entrées du capteur. Ces réservoirs permettraient d'absorber les vibrations de l'air qui peuvent être transmises ou générées par ces tubes. Une résistance à l'écoulement de l'air pourrait également être placée à chacune des entrées de ces réservoirs pour éviter des variations trop rapides de la pression. Ces résistances permettraient d'éviter les interférences qui peuvent être occasionnées lors des ouvertures et fermetures de la porte de la chambre froide et lors des arrêts et démarrages des ventilateurs de l'unité de réfrigération.

Un meilleur asservissement de l'orientation des ailettes permettrait de corriger plus rapidement la vitesse de l'air lors du décollement de la glace. Le mécanisme actionnant les ailettes permet une correction au taux de 0,8 m/min et il est actionné par le branchement ouvert ou fermé de l'alimentation électrique du moteur. La révolution du moteur est de 1 tour/min.

#### 4.6 COLLECTEUR

Le collecteur est un cylindre sur lequel l'échantillon de glace est formé et il est situé transversalement au centre de la section d'essais. Il

est en quelque sorte un obstacle avec lequel une partie des gouttes surfondues va entrer en collision. Généralement, l'ensemble glace et collecteur prend l'appellation de manchon. Le schéma de la figure A II.1 montre son emplacement approximatif dans la soufflerie.

Afin que les conditions de formation de la glace s'apparentent le plus possible à celles observées dans un milieu naturel, certaines caractéristiques des câbles de transport d'électricité à haute tension se retrouvent également sur le collecteur. Le matériau et le diamètre extérieur sont les mêmes que ceux du câble Bersimis utilisé par Hydro-Québec. Afin d'obtenir un dépôt dont l'épaisseur de la glace est plus uniforme, une faible vitesse de rotation de 1 tour/min est maintenue constante au cours de la formation du manchon. Cette faible vitesse de rotation peut être associée à la rotation des câbles de transport d'électricité qui est observée au cours des périodes d'accumulation de givre ou de verglas (*Laforte et al.*, 1983).

Le collecteur est composé de 9 pièces en aluminium qui, après le façonnage des éprouvettes, peuvent être facilement démontées pour permettre les différentes manipulations sur chacune des éprouvettes. La masse totale de l'ensemble des pièces du collecteur est de 0,6593 kg. Les plans d'assemblage et de détail sont montrés sur les figures A II.5, A II.6 et A II.7. Par l'entremise d'un assemblage fileté, les supports droit et gauche sont solidaires de la tige guide et maintiennent sur celle-ci les 6 segments cylindriques. Chaque segment, dont le diamètre extérieur est 35 mm, sert de support à une des 6 éprouvettes sur laquelle il demeure fixé. Ces segments cylindriques sont également placés dans l'appareil de cisaillement lors des essais.

#### 4.7 FABRICATION DES ÉPROUVETTES

Le façonnage des éprouvettes est effectué sur le tour parallèle. Le tournage du manchon entre mandrin et pointe mobile est effectué à la vitesse de 450 tours par minute. Dans un premier temps, le manchon est dégrossi jusqu'à un diamètre supérieur d'environ 1mm à celui nécessaire dans l'appareil de cisaillement. Ensuite, chacune des 6 éprouvettes est localisée le plus possible vers le centre des segments cylindriques du

collecteur et est sectionnée, à une épaisseur légèrement supérieure à ce qui est nécessaire, à l'aide d'un outil à tronçonner. La photo de la figure A II.8 montre la forme des éprouvettes obtenues à cette étape, sur le tour. Généralement, le façonnage au tour de la glace s'effectue sans trop de difficulté et il est relativement facile d'usiner les 6 éprouvettes avec un bon degré de précision.

Par la suite, le collecteur est démonté pour que les éprouvettes puissent être tournées en mandrin à une précision de  $\pm 0,1$  mm par rapport à leurs dimensions respectives. À la figure A II.9, la photo montre les éprouvettes ainsi obtenues sur quelques segments cylindriques du collecteur. Pour éviter des modifications de leurs dimensions ou de leur structure superficielle qui pourraient être occasionnées par la sublimation, les éprouvettes sont finalisées une à la fois avant chacun des essais. Au cours des essais, les autres éprouvettes sont conservées comme décrit au point 4.2.

Le dessin de la figure A II.10 donne les différentes dimensions des éprouvettes utilisées. Sur ce dessin la glace est représentée en foncé et un symbole en ligne brisée est superposé pour faciliter l'identification. Cependant, ce symbole ne correspond pas à l'aspect réel de la structure de l'éprouvette. Ce dessin est incorporé tel quel dans les dessins d'assemblage de l'appareil de cisaillement pour indiquer, parmi ses différentes composantes, la position de l'éprouvette.

#### 4.8 APPAREIL DE CISAILLEMENT

Même si l'objectif d'utilisation est très différent, l'appareil de cisaillement fonctionne sur le même principe que le poinçonnage des divers matériaux. En tenant compte de la forme des éprouvettes, l'utilisation de ce procédé s'avère approprié pour étudier le comportement mécanique en cisaillement de la glace. Cependant, la glace est un matériau particulier. C'est pourquoi, il est nécessaire d'utiliser un mécanisme qui, tout en évitant le fluage du matériau dans toutes les directions, permettra uniquement sa déformation selon le mode recherché. Dans ce sens, les différentes composantes de l'appareil ont été conçues



pour permettre le confinement de l'éprouvette tout au cours de l'essai de cisaillement.

L'appareil de cisaillement est composé de quatorze pièces en aluminium. Parmi celles-ci, cinq forment le poinçon. Les dessins d'assemblage des figures A II.11 et A II.12 montrent l'emplacement de chacune des pièces de l'appareil ainsi que la position du segment cylindrique et de l'éprouvette de glace. Sur la figure A II.11, des flèches sont placées sur l'éprouvette pour identifier l'emplacement de la section de glace qui est représentée au schéma de la figure 3.1. Les figures A II.13 à A II.19 correspondent aux dessins de détail des pièces de l'appareil. La rugosité moyenne de la surface des pièces en contact avec la glace est approximativement  $1,5 \mu\text{m}$ .

Les figures A II.20 et A II.21 montrent respectivement, pour le poinçon et la matrice, l'assemblage de leurs différentes pièces avec l'éprouvette. L'assemblage du poinçon sur l'éprouvette est effectué en premier. L'ajustement, à jeu nul sans serrage, entre l'éprouvette et les bagues d'appui du poinçon, est effectué à l'aide de l'écrou moleté. Cet ajustement est le même dans la matrice. Il est effectué par l'entremise des quatre vis et de la rondelle de blocage sur le dessus du corps principal de l'appareil. Également, pour permettre l'ajustement approprié en fonction de l'épaisseur de l'éprouvette utilisée, une bague de 2 ou de 4 mm d'épaisseur peut être insérée sous les bagues d'appui de la matrice.

Le cisaillement de l'éprouvette est effectué lors de la descente du poinçon qui est dirigé à l'aide de la tige guide et de l'adaptateur guide fixé à la cellule de charge. Ces deux pièces sont montrées respectivement aux figures A II.14 et A II.19. L'adaptateur s'ajuste sur le pourtour de la tige guide du poinçon et assure une descente toujours alignée dans la direction de l'axe de l'éprouvette.

#### 4.9 MISE EN CHARGE DES ÉPROUVETTES

La mise en charge des éprouvettes est effectuée à l'aide d'une presse mécanique ATS (*Applied Test Systems*). Le déplacement de la traverse de la presse est réalisé par des vis. La base de la presse, dans laquelle le mécanisme d'entraînement des vis est localisé, est entourée d'un matériau

isolant et est elle maintenue à une température constante d'environ 20 °C par un élément chauffant et un système de contrôle. Tel qu'il est indiqué sur le schéma de la figure A II.1, le mécanisme d'entraînement est asservi à l'aide d'un système de contrôle situé à l'extérieur de la chambre froide. Ce système permet la sélection de la vitesse de déplacement de la traverse de la presse de 0,00005 jusqu'à 500 mm/min. Outre le déplacement à vitesse constante, il permet aussi l'asservissement à charge constante ainsi que des modes cycliques. Le panneau de commande est muni d'une table traçante qui indique la charge appliquée en fonction du déplacement de la traverse. La cellule de charge fixée sur la traverse a une capacité maximale de 20 000 N et sa précision est de 0,5% de la force appliquée.

L'appareil de cisaillement est positionné sur un socle en métal de 36 cm de hauteur placé sur la base de la presse. L'utilisation de ce socle permet d'éviter une variation de la température de l'appareil de cisaillement qui pourrait être occasionnée par les pertes de chaleur de la base qui est chauffée. Un ventilateur est aussi utilisé pour assurer une meilleure uniformisation de la température autour la base de la presse. Finalement, l'utilisation du socle permet des manipulations plus adéquates lors du centrage de l'appareil vis à vis l'axe de la cellule de charge et pour le positionnement de la traverse.

Le positionnement de la traverse est effectué en laissant une distance libre entre les appuis de la tige guide et de l'adaptateur de la cellule de charge. Cette distance libre est nécessaire pour permettre à la traverse d'atteindre une vitesse constante avant la mise en charge. Elle varie entre 0,5 et 10 mm, tout dépendant de la vitesse de la traverse au cours de l'essai de cisaillement.

Au cours d'un essai, la durée de mise en charge est fonction de l'épaisseur de l'éprouvette et de la vitesse de déplacement de la traverse mobile de la presse. Selon ces paramètres, cette mise en charge peut durer entre 2 secondes et 94 heures. Pour les essais d'une durée supérieure à 15 minutes, l'appareil de cisaillement est entouré d'un plastique pour éviter le plus possible la sublimation de la glace.

#### 4.10 ACQUISITION ET TRAITEMENT DES DONNÉES

Le programme *acquisi.for* a été développé pour l'acquisition des données par le système informatique pendant la formation de l'échantillon de glace. Il est présenté à l'annexe III. Tel qu'indiqué par les traits discontinus à la figure A II.1 de l'annexe II, ce programme effectue l'acquisition des valeurs de la vitesse de l'air, de la pression d'eau et de la pression d'air. Il commande également l'ouverture ou la fermeture des ailettes restrictives pour corriger la vitesse de l'air. La lecture de la vitesse de l'air est effectuée à chaque seconde. Cependant, c'est la valeur moyenne de 5 lectures qui est inscrite dans le fichier. Les valeurs des pressions d'eau et d'air sont relevées à toutes les 5 secondes.

Le programme *presse.for* a été développé pour effectuer l'enregistrement du déplacement de la traverse et de la charge appliquée sur l'éprouvette lors des essais de cisaillement. Ce programme est aussi présenté à l'annexe III. À l'aide de ce programme, l'acquisition est effectuée en mode simple si la vitesse de la traverse est inférieure ou égale à 1 mm/min. Lorsque la vitesse est supérieure à cette valeur, l'acquisition est en mode balayage et complète 4 000 lectures. Dans ces modes d'acquisition, pour l'ensemble des mises en charge, la vitesse de balayage des deux canaux varie de 1 à 750 fois par seconde.

Le déplacement minimum de la traverse mesurable par le système informatique est 0,005 mm. Ainsi, tout dépendant de la vitesse d'acquisition et de la vitesse de la traverse, plusieurs lectures de la charge sur la cellule peuvent être relevées dans cet intervalle. Dans ce cas, seule la valeur moyenne des charges correspondant à une même valeur du déplacement est inscrite au fichier.

Finalement, le logiciel commercial EXCEL 4.0 est utilisé pour la présentation des résultats et pour la sortie graphique des données inscrites dans les fichiers créés à l'aide de ces deux programmes.

## CHAPITRE 5

### PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES

C'est dans une perspective d'évaluation des caractéristiques de fonctionnement de l'appareil de cisaillement que la banque des essais effectués au cours de cette étude a été élaborée. C'est pourquoi, tout en tenant compte du grand nombre d'essais nécessaires, les mesures des propriétés mécaniques de la glace ont toutes été effectuées sur un même type de glace, formé dans des conditions les plus similaires possibles. La valeur des paramètres météorologiques de formation de la glace a été sélectionnée à partir des résultats des études de Druez et al. (1984, 1986). L'utilisation de ces paramètres permet la formation d'un type de glace possédant une résistance mécanique élevée qui, lors des essais, a permis de soumettre les composantes de l'appareil de cisaillement à des sollicitations mécaniques sévères. Dans ces conditions, le bon fonctionnement de l'appareil assure qu'il peut être utilisé pour l'évaluation des propriétés mécaniques des autres types de glace.

#### 5.1 VALEURS DES PARAMÈTRES

##### 5.1.1 Température et vitesse de l'air

Une température de  $-14 \pm 1^\circ\text{C}$  a été maintenue dans la chambre froide lors de la formation de la glace, de l'usinage des éprouvettes et des essais de cisaillement.

La valeur cible de la vitesse de l'air dans la soufflerie a été fixée à 16 m/s. Pour 37 des 38 manchons de glace utilisés pour la fabrication des éprouvettes, la vitesse moyenne de l'air a été de 15,9 m/s avec un écart type de 0,35 m/s. Le tableau A I.3 donne les valeurs moyennes, maximales et minimales des vitesses de l'air mesurées lors de la formation de chacun de ces manchons. Il donne également les pressions moyennes

de l'air et de l'eau, mesurées lors de l'alimentation de la buse de pulvérisation. Parmi ces manchons, 8 n'ont pas été formés lorsque le système d'asservissement de la vitesse était en fonction. Lors de la formation des manchons numéros 5 et 7, la vitesse a été corrigée manuellement. Les données acquises lors de la formation du manchon numéro 35 n'ont pu être récupérées. Cependant, les valeurs des pressions et des vitesses auraient été assez semblables à celles des manchons voisins dans le tableau. Les graphiques déjà présentés à la figure A II.4 sont représentatifs des comportements de la vitesse de l'air autour des valeurs moyennes.

### 5.1.2 Teneur en eau de l'air

La valeur cible de la teneur en eau  $W$  de l'air dans la soufflerie était  $1,2 \text{ g/m}^3$ . La méthode du cylindre en rotation, développée par Rush et Wardlaw (1957), a été utilisée pour mesurer cette valeur. La méthode consiste à utiliser comme collecteur un petit cylindre en rotation sur lequel il se formera une certaine quantité de glace au cours d'un temps déterminé. Avec les conditions de formation et la valeur de la masse de glace formée, il est possible d'évaluer la teneur en eau. Dans cette étude, 25 relevés de la teneur en eau ont été effectués. Le tableau A I.5 donne les divers ajustements, les paramètres, ainsi que les valeurs obtenues lors du dernier relevé. La teneur en eau est déterminée par la valeur moyenne de 8 mesures effectuées à l'aide d'autant de cylindres. Ces cylindres sont en bronze et ils sont retenus, un à la fois, pendant une minute, au centre de la section d'essais par des tiges en téflon vissées sur les extrémités. La vitesse de rotation des cylindres est 1 tour par minute. L'équation suivante est utilisée pour déterminer la valeur de la teneur en eau:

$$W = \frac{\rho_g \times \pi}{\eta \times v \times t} \times e \quad (5.1)$$

Avec:  $\rho_g$  = Masse volumique de la glace, ( $800 \text{ kg/m}^3$ )  
 $\eta$  = Coefficient de captation, (0,9)  
 $v$  = Vitesse de l'air dans la soufflerie, ( $16 \text{ m/s}$ )  
 $t$  = Temps d'exposition du cylindre, (60 sec)  
 $e$  = Épaisseur équivalente de la glace, (m)

Le coefficient de captation  $\eta$  est déterminé à l'aide des graphiques qui sont présentés dans l'étude de Rush et Wardlaw (1957). Ce coefficient est expliqué subséquemment au chapitre 6.2. Sa valeur est cependant conservatrice; elle est près de 1 selon les paramètres de l'étude de Langmuir et Blodgett (1946). La masse volumique de la glace est estimée près de la valeur moyenne qui est normalement obtenue pour le givre dur.

Dans l'équation 5.1, l'épaisseur équivalente  $e$  de la glace qui est formée sur le cylindre est calculée comme suit:

$$e = \left( \frac{m_g}{\rho_g \times \pi \times L} + \frac{D_c^2}{4} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{D_c}{2} \quad (5.2)$$

$D_c$  = Diamètre du collecteur, (0,0062 m)

$m_g$  = Masse de la glace sur le collecteur, (kg)

$L$  = Longueur de la glace sur le collecteur, (m)

Le tableau A I.6 donne les valeurs des 25 relevés de la teneur en eau en fonction des conditions d'alimentation de la buse de pulvérisation. Dans tous ces relevés, ce sont les valeurs de la pression d'air et du débit d'eau qui ont été modifiées pour atteindre la teneur en eau désirée. Il ne faut pas tenir compte des valeurs de la pression d'eau et de la vitesse de la pompe puisqu'elles sont dépendantes des deux précédentes. Toutes les autres variables sont demeurées identiques à celles données au tableau A I.5. L'équation linéaire suivante exprime la valeur de la teneur en eau  $W$ , en fonction de la pression d'air  $P_a$  et du débit d'eau  $Q_e$ :

$$W = -0,009 P_a + 0,026 Q_e + 1,4 \quad (5.3)$$

Coefficient de détermination,  $r^2 = 0,48$

Indice F = 10

Degrés de liberté = 22

Table statistique F à 95% = 3,44

Quoique pour ce modèle la valeur du coefficient d'écart soit faible, il est tout de même représentatif et permet d'indiquer le degré d'influence de chacune des variables de contrôle  $P_a$  et  $Q_e$  sur la valeur de la teneur en eau. Les informations sur les paramètres statistiques utilisés sont données au chapitre 7.3.5.

Plusieurs relevés du tableau A I.6 ont été répétés avec les mêmes valeurs de fonctionnement pour vérifier dans quelle mesure les résultats peuvent varier lorsque les mêmes conditions de formation des gouttelettes sont recréées dans la chambre froide. Le tableau 5.1 donne les valeurs moyennes et les écarts types pour les différents ajustements de la pression d'air et du débit d'eau. Les valeurs de 152 kPa et de 48 ml/min ont été utilisées au cours de cette étude. Avec ces ajustements la valeur moyenne de la teneur en eau est de 1,3 g/m<sup>3</sup>, soit un écart de 0,1 g/m<sup>3</sup> au-dessus de la valeur cible.

**Tableau 5.1:** Valeurs moyennes et écarts types de la teneur en eau pour les différents ajustements de la pression d'air et du débit d'eau.

Ajustement air-eau (kPa-ml/min)	Teneur en eau moyenne, W (g/m <sup>3</sup> )	Écart type (g/m <sup>3</sup> )	Nombre de mesures
172-67	1.27	0.06	8
172-64	1.63	0.16	24
172-55	1.37	0.19	8
172-52	1.61	0.12	8
172-51	1.18	0.16	40
172-50	1.14	0.12	16
172-48	1.09	0.06	8
159-60	1.71	0.17	8
152-51	1.46	0.14	24
152-49	1.29	0.12	16
152-48	1.28	0.15	32

La valeur expérimentale de la teneur en eau est supérieure à celle théorique, 0,95 g/m<sup>3</sup>, calculée à partir du débit d'eau et de la vitesse de l'air utilisés. Cette valeur théorique est obtenue en supposant une répartition uniforme de la quantité d'eau introduite dans la soufflerie par rapport au volume d'air correspondant. Les gouttelettes ne se distribuent pas uniformément dans l'aire transversale de la section d'essais lorsqu'elles sont entraînées dans la soufflerie, c'est pourquoi cette différence est constatée. Présentée au chapitre 6.1, la forme des

manchons de glace, dont le diamètre est plus important dans la partie centrale, indique également que la valeur de la teneur en eau est supérieure au centre de l'aire transversale. Il est possible que près des extrémités du manchon la valeur de la teneur en eau soit inférieure à la valeur théorique. Des mesures de la teneur en eau relevées en plusieurs endroits sur l'axe du collecteur seraient nécessaires pour déterminer plus précisément la distribution des gouttelettes dans la soufflerie.

La valeur théorique de la teneur en eau  $W_{th}$  est déterminée comme suit:

$$W_{th} = \frac{Q_e}{v \times A} \quad (5.4)$$

Dans laquelle:

$Q_e$  = Débit d'eau, (0,8 g/s)

$v$  = Vitesse de l'air dans la soufflerie, (16 m/s)

$A$  = Aire transversale de la section d'essais, (0,0529 m<sup>2</sup>)

### 5.1.3 Diamètre volumique médian des gouttelettes

Pour le diamètre volumique médian des gouttelettes d'eau, la valeur cible était 40 µm. Le diamètre volumique médian est la valeur du diamètre des gouttelettes correspondant à 50% du volume cumulatif de l'ensemble d'un échantillonnage. La méthode de mesure utilisée est semblable à celle développée par Godard (1960). Cette méthode consiste à évaluer le diamètre des gouttelettes en mesurant les marques qu'elles laissent sur un film de collargol. Lors de la collision, les gouttelettes se déforment et laissent des empreintes circulaires dont le pourtour est plus foncé. Le diamètre d'une empreinte équivaut à approximativement 3 fois celui de la gouttelette.

L'appareil utilisé pour effectuer cette mesure a été développé par Dang Du Nguyen, professionnel de recherche pour le Groupe de Recherche en Ingénierie de l'Environnement Atmosphérique (GRIEA) à l'Université du Québec à Chicoutimi. Cet appareil consiste en un petit tube en acier mince, percé d'une ouverture sur sa paroi, dans lequel est placé un coulisseau maintenant une lamelle de verre préalablement enduite d'un film de collargol. Le tube est placé à la verticale, à l'emplacement du



collecteur, au centre de la section d'essais. Lorsqu'il est libéré, le coulisseau tombe et passe devant l'ouverture à travers laquelle les gouttelettes peuvent entrer en collision avec la lamelle. La surface des lamelles mesure  $5 \times 20$  mm. Cet essai est effectué à la température de  $2^\circ\text{C}$ .

Au total, 11 relevés du spectre volumique des gouttelettes ont été effectués. Chaque relevé est le résultat des lectures effectuées sur 3 lamelles en moyenne. Ces lamelles sont sélectionnées, parmi un lot de 12, selon la qualité et le nombre des impacts des gouttelettes. Les lamelles de chaque lot sont successivement exposées dans des conditions identiques de fonctionnement de la buse et de la soufflerie.

Un microscope, avec une lentille graduée, est utilisé pour déterminer le diamètre des empreintes sur les lamelles. Ainsi, 33 lamelles ont été parcourues par bandes successives de 5 mm de longueur pour un total de près de 22 000 empreintes mesurées. Le tableau A I.7 donne, par exemple, les valeurs obtenues lors d'un relevé du spectre des gouttelettes. Lors de la lecture, les empreintes sont classées dans des intervalles de grandeur de  $12\ \mu\text{m}$ . Le diamètre moyen des gouttelettes qui correspond à chacun de ces intervalles est inscrit dans la première colonne du tableau. Par correspondance de cette colonne avec la dernière, la valeur du diamètre volumique est interpolée à 50% du volume cumulé. Le graphique de la figure A II.22 montre, à partir des valeurs de ce tableau, la distribution du nombre et du volume des gouttelettes en fonction du diamètre.

Les résultats des 11 relevés du spectre des gouttelettes et les valeurs correspondantes de la pression de l'air et du débit d'eau utilisés sont inscrits au tableau A I.8. Dans la dernière colonne, les écarts sur la précision du diamètre volumique sont déterminés à partir de l'erreur statistique. Cette erreur dépend du nombre de gouttelettes mesurées et est déterminée comme suit:

$$e = \frac{\sqrt{N}}{N} \quad (5.5)$$

La relation suivante exprime la valeur du diamètre volumique médian en fonction de la pression d'air  $P_a$  et du débit d'eau  $Q_e$ :

$$d_v = -0,182 P_a + 0,019 Q_e + 65 \quad (5.6)$$

Coefficient de détermination,  $r^2 = 0,11$

Indice F = 0,48

Degrés de liberté = 8

Table statistique F à 95% = 4,46

Les valeurs du coefficient et de l'indice F indiquent que ce modèle n'est pas approprié. Même pour un autre modèle, la dispersion et le faible nombre de valeurs des diamètres volumiques n'assurent pas une meilleure représentation du comportement en fonction des variables  $P_a$  et  $Q_e$ . Cependant, ce modèle donne tout de même une indication de l'influence et de l'importance de ces variables. De la même façon que pour la teneur en eau, le diamètre volumique varie dans le sens inverse de la pression de l'air et dans le même sens que le débit d'eau. Par contre, dans ce second modèle, l'influence du débit d'eau est presque négligeable comparativement à celle de la pression d'air.

Les valeurs des diamètres volumiques médians inscrites au tableau A I.8 sont reportées en fonction de la pression d'air à la figure A II.23. Sur ce graphique, la droite de régression linéaire montre la variation du diamètre volumique en considérant uniquement, dans l'équation 5.6, la variable de contrôle de la pression d'air. Malgré les lacunes du modèle, la position et l'orientation de cette droite sont probablement assez représentatives du comportement réel. Il est logique qu'une plus grande pression d'air augmente la dispersion de l'eau, ce qui contribue à diminuer le diamètre des gouttelettes.

Le tableau suivant donne, pour chacun des relevés du tableau A I.8, les valeurs moyennes des diamètres volumiques médians qui ont été obtenus avec les mêmes pressions d'air et les mêmes débits d'eau. La valeur moyenne des 11 mesures du diamètre volumique médian est 37,6  $\mu\text{m}$  et l'écart type est 10,7  $\mu\text{m}$ . Pour les ajustements utilisés de l'alimentation de la buse de pulvérisation à 152 kPa pour la pression d'air et à 48 ml/min pour le débit d'eau, le résultat moyen des 3 mesures du

diamètre volumique est 44  $\mu\text{m}$ , soit 4  $\mu\text{m}$  plus élevé que la valeur cible. L'écart type est relativement élevé et équivaut à 25% de la valeur moyenne.

**Tableau 5.2:** Valeurs moyennes des diamètres volumiques médians obtenus avec les mêmes ajustements de la pression d'air et du débit d'eau.

Ajustement air-eau (kPa-ml/min)	Diamètre volumique médian ( $\mu\text{m}$ )	Écart type ( $\mu\text{m}$ )	Nombre de mesures
179-48	30	1.8	2
172-64	38	—	1
172-51	31	—	1
152-51	38	19.9	2
152-48	44	11.8	3
124-48	39	12.7	2

## 5.2 INTERACTION ENTRE LES PARAMÈTRES

Il est difficile de déterminer quelles valeurs des variables communes à la teneur en eau et au diamètre volumique doivent être utilisées pour ajuster ces paramètres atmosphériques aux valeurs cibles. Ces difficultés sont en partie occasionnées par l'interaction entre les conduits d'alimentations en air et en eau de la buse. Dans la buse, il s'établit un équilibre entre les pressions et les débits puisque les conduits d'alimentations communiquent. Dans ces conditions, la modification de la valeur d'un paramètre conduit à un nouvel équilibre du circuit. De plus, tel que montré à l'aide des modèles du paragraphe précédent, la valeur de la teneur en eau et celle du diamètre volumique médian sont fonction des deux mêmes variables, ce qui implique que l'ajustement des paramètres atmosphériques s'effectue de façon plus ou moins couplée. Dans ces conditions de fonctionnement où les comportements sont mal connus et difficilement prévisibles, la méthode d'ajustement par essais et erreur s'applique pour faciliter l'ajustement des paramètres.

D'un autre côté, il y a aussi une relation directe entre la vitesse de l'air dans la soufflerie et la valeur de la teneur en eau. L'équation 5.1

indique que cette valeur est inversement proportionnelle à celle de la vitesse de l'air. Les écarts autour de la valeur cible de la teneur en eau sont relativement importants lorsque les valeurs maximales et minimales de la vitesse de l'air sont utilisées dans cette équation. Les valeurs maximales et minimales sont données au tableau A I.3. Cependant, les valeurs limites sont obtenues pendant des temps très courts comparativement à celui nécessaire pour toute la formation d'un manchon. Il faut considérer que l'écart-type de la vitesse, mentionné au chapitre 4.5.4, se situe aux alentours de 0,5 m/s. Finalement, au cours de cette étude, une seule valeur cible de la vitesse de l'air a été utilisée pour la formation des manchons. Il n'a donc pas été nécessaire d'effectuer d'autres ajustements de l'alimentation de la buse de pulvérisation.

## CHAPITRE 6

### GLACE ATMOSPHERIQUE PRODUITE EN LABORATOIRE

Dans cette étude, un total de 43 manchons de glace ont été formés dans les mêmes conditions atmosphériques, les valeurs des paramètres ont été données au chapitre précédent. Parmi ces manchons, les 5 premiers ont été formés dans le cadre de travaux préliminaires. Les pressions et les vitesses mesurées pendant la formation de ces 5 manchons sont données au tableau A I.4. Ces manchons ont été utilisés pour effectuer des mesures de la densité de la glace. Ils ont été également utiles pour développer la technique d'usinage des éprouvettes et pour vérifier la fiabilité de l'ensemble des autres procédures et manoeuvres.

#### 6.1 MANCHON DE GLACE

Une fiche descriptive des paramètres de formation et des caractéristiques physiques d'un manchon est montrée au tableau A I.9. Cette fiche, qui a été complétée pour chacun des manchons, contient un dessin à l'échelle de la forme de ces derniers, les valeurs des ajustements et des paramètres atmosphériques utilisés ainsi que le calcul de la masse volumique de la glace. La forme du manchon est représentée à l'aide de cinq mesures du diamètre extérieur dont les valeurs sont inscrites aux positions identifiées par des lettres.

Pour tous les manchons, l'épaisseur de la glace est généralement plus grande au centre du collecteur qu'aux extrémités. De plus, dans la couche limite d'écoulement de l'air, jusqu'à une distance d'environ 15 mm des parois de la section d'essais, l'épaisseur varie rapidement et elle est presque nulle à 2 ou 3 mm des surfaces des parois. À ces endroits, l'absence de formation de la glace est probablement due à l'infiltration d'air dans les espaces libres entre le collecteur et les trous dans les parois.

Ces espaces sont dus aux jeux qui sont nécessaires pour permettre la rotation du collecteur dans les trous des parois.

Le tableau suivant donne, pour chacune des positions qui sont indiquées sur le dessin du manchon au tableau A I.9, les valeurs statistiques des diamètres mesurés sur l'ensemble des manchons de glace.

**Tableau 6.1:** Valeurs statistiques des diamètres pour l'ensemble des manchons de glace.

	Diamètre des manchons (mm)				
Position	G	CG	C	CD	D
Moyenne	76	94	100	92	78
Écart-type	7	8	9	12	12
Maximum	96	115	124	117	105
Minimum	62	72	72	68	57

Les valeurs moyennes des diamètres sont relativement symétriques de part et d'autre du centre du manchon. Cependant, les valeurs des écarts-types indiquent une plus grande dispersion des diamètres du côté droit du manchon. Cette dispersion est l'indice que la glace se forme de façon plutôt asymétrique sur toute la longueur du collecteur. En entrant dans la soufflerie, l'air tourbillonne légèrement dans le sens horaire et est probablement la cause d'une distribution non uniforme de la teneur en eau. Cette asymétrie peut également provenir de l'orientation de la buse, qui doit être parfois corrigée au cours de la formation du manchon pour obtenir une accumulation de la glace plus symétrique.

La photographie de la figure A II.24 montre un manchon dans la section d'essais de la soufflerie. Sur cette photographie, l'observateur est situé du côté avant droit de la soufflerie. Cette photographie montre aussi les accumulations de la glace qui se forme sur les parois de la section d'essais.

Le tableau A I.10 donne les caractéristiques de formation de tous les manchons, ainsi que leur masse volumique. Les caractéristiques comprennent le temps de formation, la masse de la glace accumulée, le taux moyen d'accumulation et le coefficient de captation expérimental.

Pour chacun de ces paramètres, les valeurs statistiques sont présentées au tableau 6.2 suivant.

**Tableau 6.2:** Valeurs statistiques des paramètres du tableau A I.10.

	$t_f$ (min)	$m_g$ (g)	$I_a$ (g/min)	$\eta$	$\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )
Moyenne	136.2	908.9	6.6	0.41	841.0
Écart-type	21.8	180.2	0.5	0.02	13.6
Maximum	190	1375.4	7.65	0.48	872.4
Minimum	77	469.1	5.02	0.35	801.5

$t_f$  = Temps de formation du manchon

$m_g$  = Masse totale de la glace accumulée

$I_a$  = Taux d'accumulation

$\eta$  = Coefficient de captation expérimental

$\rho_g$  = Masse volumique de la glace

## 6.2 COEFFICIENT DE CAPTATION

Le coefficient de captation, dont la valeur est comprise entre 0 et 1, est le ratio entre la masse de la glace accumulée et la masse totale des gouttelettes dirigées devant la surface de la section de l'obstacle. Comme dans les travaux effectués par Makkonen et al. (1987), la dimension de la section est déterminée en considérant le diamètre moyen de l'obstacle. Les coefficients donnés au tableau A I.10 sont déterminés à l'aide de l'équation suivante:

$$\eta = \frac{m_g}{w \times v \times t_f \times L \times (D_c + e)} \quad (6.1)$$

Dans laquelle:

$m_g$  = Masse de la glace sur le collecteur, (kg)

$w$  = Teneur en eau, (0,0013 kg/m<sup>3</sup>)

$v$  = Vitesse de l'air, (16 m/s)

$t_f$  = Temps de formation du manchon, (s)

$L$  = Longueur corrigée du manchon, (0,21 m)

$D_c$  = Diamètre du collecteur, (0,035 m)

$e$  = Épaisseur équivalente de la glace, (m)

Dans l'équation 6.1, l'épaisseur équivalente  $e$  de la glace est déterminée à l'aide de l'équation 5.2 du chapitre précédent. Dans cette équation, la valeur de la masse volumique de la glace est  $841 \text{ kg/m}^3$ , soit la valeur moyenne obtenue dans l'évaluation de ce paramètre qui est présentée au chapitre suivant. La valeur  $(D_c + e)$  est le diamètre moyen équivalent du manchon. Il représente la moyenne entre le diamètre du collecteur  $D_c$  et le diamètre équivalent de la glace. Ce dernier est la valeur du diamètre extérieur de la glace en considérant que l'épaisseur est uniforme. Également, afin de tenir compte de la diminution de la glace formée dans la couche limite d'écoulement de l'air près des parois, la moitié de l'épaisseur de ces couches est soustraite de la longueur totale de la glace qui recouvre le collecteur. La longueur du manchon  $L$  se trouve ainsi diminuée de 15 mm.

En considérant la valeur théorique de la teneur en eau,  $0,95 \text{ g/m}^3$ , calculée au chapitre 5.1.2, la valeur moyenne du coefficient de captation donnée au tableau 6.2 augmente à 0,57. Cette valeur s'accorde moins avec celle, approximativement 0,45, obtenue en considérant les paramètres  $K$  et  $\phi$  donnés par Langmuir et Blodgett (1946). Ces paramètres sont fixés en fonction du rayon des gouttelettes, du rayon du cylindre et de la vitesse de l'air.

### 6.3 MASSE VOLUMIQUE DE LA GLACE

Deux méthodes ont été utilisées pour déterminer la valeur de la masse volumique de la glace. La première méthode consiste à déterminer cette valeur à partir du cylindre de glace qui est usiné dans le manchon avant le tronçonnage des éprouvettes. Les dimensions ainsi que la masse de la glace de ce cylindre sont utilisées pour déterminer directement la valeur de la masse volumique en tenant compte des caractéristiques du collecteur. Les éléments du calcul de la masse volumique par cette méthode sont donnés sur la fiche descriptive du manchon au tableau A I.9. Les valeurs de la masse volumique de la glace, qui ont été déterminées avec cette méthode, sont inscrites au tableau A I.10.

Dans la deuxième méthode, le principe d'Archimède est utilisé pour déterminer le volume du matériau. Cette méthode consiste, après avoir



mesuré sa masse, à évaluer le volume d'un morceau de glace en mesurant la poussée qui est exercée sur lui lorsqu'il est maintenu en suspension dans un contenant d'huile. Avant de mesurer sa masse, le morceau de glace, qui a été taillé à même le manchon, est préalablement sablé pour éliminer ses arêtes et est également entaillé pour permettre d'être maintenu par un fil très fin. Par la suite, le fil est attaché au morceau et ce dernier est trempé dans du formvar. Ce produit, après séchage, formera une pellicule plastique qui évitera que le morceau de glace soit en contact direct avec l'huile dans laquelle il sera immergé, en raison de la porosité de la glace atmosphérique. Le contenant d'huile est situé sur le plateau d'une balance. La mesure de la poussée, qui est exercée par l'huile déplacée, permet d'évaluer le volume du morceau de glace. Le tableau A I.11 présente les divers calculs et mesures effectués pour obtenir la masse volumique de 3 morceaux de glace taillés dans le manchon numéro D.

La technique de mesure de la masse volumique à partir du principe d'Archimède a été utilisée sur 18 morceaux de glace qui ont été taillés sur 6 manchons. Pour chacun de ces morceaux de glace, les valeurs des masses volumiques obtenues sont inscrites au tableau A I.12 et les paramètres statistiques sont donnés au tableau qui suit.

**Tableau 6.3:** Paramètres statistiques pour les masses volumiques du tableau A I.12.

	Masse du morceau de glace $M_g$ (g)	Masse volumique, (principe d'Archimède) $\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )
Moyenne	19	863
Écart-type	6.8	10.5
Maximum	27.65	886
Minimum	5.63	834

La figure A II.26 présente, sous forme graphique, l'ensemble des valeurs de la masse volumique qui ont été obtenues en utilisant les deux méthodes, ainsi que les régressions linéaires correspondantes.

L'incertitude découlant du degré de précision des diverses mesures effectuées dans la méthode du cylindre (première méthode) est approximativement de  $\pm 30 \text{ kg/m}^3$ . Cette valeur peut varier selon les dimensions du cylindre. De la même façon, pour l'autre méthode, l'utilisation du principe d'Archimède conduit à une incertitude de  $\pm 4 \text{ kg/m}^3$ . Cette dernière méthode nécessite néanmoins beaucoup plus de manipulations qui augmentent d'autant les risques d'erreurs fortuites. Toutefois, cette méthode peut être utilisée sans égard à la forme du matériau. Comparativement à la méthode de mesure utilisant le principe d'Archimède, celle du cylindre donne des valeurs en moyenne 2,3% plus basses. La cause réelle de cette différence n'est pas identifiée. Cependant, une légère pénétration du formvar à travers les porosités de la glace pourrait expliquer cette différence.

Finalement, l'orientation des droites de régression de la figure A II.26 indique une diminution de la masse volumique de la glace des manchons. Cette diminution, d'environ  $10 \text{ kg/m}^3$ , semble avoir été assez graduelle et s'échelonne tout au cours de la formation des divers manchons. Elle pourrait être causée par une modification des caractéristiques de fonctionnement de la buse de pulvérisation qui a été utilisée pour la formation de tous les manchons. L'usure progressive des composantes de la buse a pu causer une augmentation régulière du débit d'air. Cette variation du débit d'air a pu occasionner à son tour une modification des valeurs du diamètre volumique médian des gouttelettes et de la teneur en eau. Au cours de la formation des manchons, le débit d'air de la buse n'était pas mesuré, ce qui n'a pas permis d'observer s'il y a eu effectivement une variation de ce paramètre. Cependant, si tel avait été le cas, des variations des taux d'accumulation et des coefficients de captation, donnés au tableau A I.10, auraient probablement pu être observées. Des travaux effectués au cours d'autres études (*Druez et al.*, 1978 ; *Laforte et al.*, 1982), ont permis d'observer une diminution de la masse volumique de la glace lorsque la température diminue. De même, la variation de la teneur en eau ou du diamètre volumique médian des gouttelettes peut également avoir une influence sur cette valeur (*Laforte et al.*, 1982).

## CHAPITRE 7

### ESSAIS DE CISAILLEMENT

#### 7.1 PARAMÈTRES DES ESSAIS

Quatre paramètres permettent de caractériser chacun des essais de cisaillement. Ces paramètres sont l'épaisseur et le diamètre extérieur de l'éprouvette, le jeu entre le poinçon et la matrice de l'appareil de cisaillement et la vitesse de déplacement de la traverse mobile de la presse. À l'exception de ce dernier paramètre qui permet d'évaluer plus spécifiquement les propriétés rhéologiques de la glace, les autres servent, selon les différentes valeurs qui leur sont attribuées, à déterminer leur influence sur les résultats obtenus.

Des éprouvettes de 8, 10 et 12 mm d'épaisseur, et de 68 et 70 mm de diamètre extérieur ont été utilisées dans les essais de cisaillement. Ces paramètres sont identifiés sur la figure A II.10 de l'annexe II.

L'utilisation d'éprouvettes de différentes épaisseurs a pour objet de vérifier si ce paramètre a une influence sur la valeur de la contrainte maximale de rupture du matériau. Cette valeur est reliée au comportement mécanique du matériau et elle est indépendante de la surface de la section de rupture de l'éprouvette. Si le principe et le fonctionnement de l'appareil sont adéquats, la force de rupture doit varier proportionnellement avec cette surface.

En relation avec le diamètre extérieur des éprouvettes, les modes de mise en charge de l'appareil de cisaillement sont définis comme étant effectués en confinement total ou en confinement partiel. En considérant également que les côtés de l'éprouvette sont en appui contre les bagues du poinçon et de la matrice, l'essai est effectué en confinement total lorsque le pourtour extérieur de l'éprouvette est en contact avec le corps principal

de l'appareil de cisaillement. Dans ce cas, le diamètre extérieur de l'éprouvette est ajusté jusqu'à ce que l'éprouvette puisse être insérée en glissant sans serrage dans le corps de l'appareil. La valeur du diamètre de l'éprouvette est alors 70 mm, comme pour le corps de l'appareil. Dans l'autre mode, appelé confinement partiel, l'éprouvette est usinée à un diamètre de  $68 \pm 0,1$  mm et son pourtour n'est pas en contact avec le corps de l'appareil lors de la mise en charge. Cette valeur du diamètre laisse un jeu radial d'environ 1 mm entre l'éprouvette et le corps de l'appareil.

Le jeu entre le poinçon et la matrice est le troisième paramètre qui caractérise les essais de cisaillement. Trois paires de bagues d'appui de la matrice, avec des diamètres intérieurs de dimensions différentes, ont été utilisées dans l'appareil. Ces dimensions sont données à la figure A II.16. Ainsi, les trois jeux diamétraux correspondants, qui sont déterminés par la différence entre les diamètres intérieurs des bagues d'appui de la matrice et le diamètre extérieur de la paire de bagues d'appui du poinçon, sont respectivement 0,43, 0,75 et 2,13 mm. Puisque l'éprouvette est complètement rompue lors de l'essai, un jeu est nécessaire pour éviter qu'il y ait contact entre ces diverses composantes lors de la descente du poinçon. Comme précédemment, il est utile d'utiliser différents ajustements entre le poinçon et la matrice pour vérifier l'influence de ce paramètre sur le comportement du matériau. Ces ajustements permettent aussi d'évaluer si le modèle de déformation utilisé pour déterminer le taux de déformation est conforme au comportement observé. Le modèle est défini au chapitre 3.6.

La surface de la section de rupture de l'éprouvette est déterminée à partir du diamètre extérieur du poinçon. C'est à ce diamètre que la surface est minimale et que la contrainte est maximum. Cette surface et cette contrainte de cisaillement sont exprimées par les relations suivantes:

$$S = \pi \times D_p \times E_e \quad (\text{m}^2) \quad (7.1)$$

Dans laquelle:

$D_p$  = Diamètre extérieur du poinçon (0,0509 m)

$E_e$  = Épaisseur de l'éprouvette (m)

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (\text{Pa}) \quad (7.2)$$

Dans laquelle:

$F$  = Force appliquée sur l'éprouvette (N)

Finalement, le quatrième paramètre est la vitesse de déplacement de la traverse mobile de la presse. Cette vitesse correspond aussi à celle de descente du poinçon et elle permet l'application des différents taux de déformation. Seize vitesses ont été utilisées pour la traverse. En remplaçant les termes de l'équation 3.25 par les paramètres vitesse et jeu diamétral, le taux de déformation s'exprime comme suit:

$$\dot{\gamma} = \frac{v_t \times 2}{J_d} \quad (s^{-1}) \quad (7.3)$$

Dans laquelle:

$v_t$  = Vitesse de déplacement de la traverse mobile (mm/sec)

$J_d$  = Jeu diamétral entre la matrice et le poinçon (mm)

## 7.2 INFLUENCE DES PARAMÈTRES

Certaines caractéristiques des comportements observés, comme le regroupement des valeurs et la géométrie de leurs distributions, permettent de déterminer l'influence des différents paramètres utilisés dans les essais de cisaillement. Ces influences, présentées et discutées plus en détail dans la présentation des résultats des essais au chapitre 7.3, sont plus facilement identifiables à l'aide des lissages de courbes effectués sur les distributions des valeurs obtenues. Ces valeurs sont principalement les contraintes maximales obtenues pour chacune des configurations d'essais.

En ce qui concerne l'épaisseur de l'éprouvette, les valeurs qui ont été utilisées pour ce paramètre ne sont pas très différentes (tableau 7.1), ce qui permet de supposer que les effets sur le comportement du matériau ne devraient pas être très significatifs. Les figures A II.37 et A II.43 montrent que c'est bien le cas puisque les résultats sont regroupés. Dans ces conditions, il n'a donc pas été nécessaire de présenter une analyse systématique des résultats en fonction de ce paramètre.

Par contre, le diamètre extérieur de l'éprouvette a une influence très importante puisqu'il correspond, selon la dimension utilisée, à l'un ou l'autre des modes de confinement, total ou partiel. Cette influence est

d'ailleurs facile à remarquer puisque les formes des courbes de distribution des contraintes maximales associées à chacun des modes sont nettement distinctes. Ces différences sont mises en évidence par les figures A II.45 et A II.46 qui présentent la superposition des résultats pour ces deux modes d'essais. En confinement total, la pente des courbes de distribution des contraintes maximales est toujours positive à l'intérieur de la gamme des vitesses de la traverse utilisées. Pour le confinement partiel, ces contraintes passent par un maximum et la pente des courbes est par la suite négative.

En général, le comportement de la glace atmosphérique en cisaillement est caractérisé à partir des paramètres tels que le taux de déformation en cisaillement  $\dot{\gamma}$  (Lavrov, 1969; Saeki, 1985) et le module de cisaillement  $G$  (Lavrov, 1969). Évidemment, l'expression mathématique du taux de déformation dépend du modèle utilisé pour analyser la déformation du matériau. Il est utilisé pour différencier les résultats en fonction de la variation dans le temps d'un paramètre adimensionnel indépendant de plusieurs paramètres des essais. Ici, comme l'indique l'équation 7.3, le taux de déformation fait intervenir la vitesse de déplacement de la traverse de la presse et le jeu radial entre le poinçon et la matrice. Dans les études citées précédemment, c'est l'épaisseur de l'éprouvette qui est considérée de préférence au jeu radial puisque l'appareillage utilisé est différent. Le module de cisaillement, qui est une caractéristique intrinsèque du matériau, permet de discuter de la validité du modèle utilisé pour exprimer la valeur du taux de déformation. Dans la présente étude, sa valeur est davantage une évaluation qualitative de la propriété du matériau, puisque les essais ne font pas intervenir, exclusivement, les propriétés élastiques de la glace atmosphérique qui est un matériau poreux et compactable. Sa valeur est cependant utile pour évaluer l'influence du jeu de l'appareil sur les comportements observés. Les dimensions du jeu utilisées n'ont pas occasionné de variation significative du comportement de l'éprouvette et ont de ce fait, à l'inverse, une relation directe avec la valeur du module de cisaillement. Cette relation sera vérifiée plus loin, au chapitre 7.3.3. Il faut ajouter que le comportement de l'éprouvette est essentiellement influencé par la vitesse de la presse et par le mode de confinement. La vitesse de la presse a donc

été ramenée, de façon conventionnelle, à un taux de déformation  $\dot{\gamma}$  en cisaillement, mais cette valeur, somme toute nominale, est davantage un indice de la vitesse des essais qu'une valeur scientifiquement établie.

### 7.3 RÉSULTATS DES ESSAIS

Un total de 213 essais de cisaillement ont été effectués au cours de cette étude. Le tableau qui suit donne le nombre des essais correspondant à chacun des différents paramètres des éprouvettes et de l'appareil de cisaillement utilisés.

**Tableau 7.1:** Nombre des essais effectués pour chacune des valeurs des paramètres de l'appareil et des éprouvettes.

Type de confinement	Épaisseur des éprouvettes	Jeu poinçon-matrice (mm)		
		0,43	0,75	2,19
Total	8 mm	1	32	0
	10 mm	18	35	18
	12 mm	2	38	0
Partiel	8 mm	0	2	0
	10 mm	23	21	15
	12 mm	0	3	0

Le tableau A I.13 indique les paramètres utilisés et les valeurs maximales des contraintes de cisaillement obtenues lors de ces essais. Dans ce tableau, à la suite des numéros et des dates des essais, la troisième colonne contient les numéros des éprouvettes. Dans cette colonne, les numéros contenus dans une série indiquent que les essais correspondants ont été effectués sur des éprouvettes usinées dans un même manchon. De plus, certains essais sont identifiés avec un indice, \* ou \*\*, à la fin de la ligne. Le premier indice indique que les paramètres préétablis pour l'essai n'ont pas tous été satisfaits et que les résultats ne sont pas inclus dans les graphiques. Les principaux motifs de rejet de ces essais sont des fissures qui étaient présentes dans l'éprouvette avant la mise en charge, des morceaux manquants sur son pourtour qui ne permettaient pas d'obtenir le confinement adéquat, ou des charges appliquées sur l'éprouvette lors du positionnement de la traverse au-dessus

de l'appareil. L'indice double indique que l'acquisition des données par le système informatique est manquante pour ces essais. Dans ce cas, les valeurs des charges maximales appliquées ont été relevées sur le panneau de commande de la presse. Des informations complémentaires sont données à la fin du tableau. Dans la plupart des cas, trois essais de cisaillement ont été effectués pour chacun des taux de déformation des éprouvettes.

### 7.3.1 Courbes représentatives des essais

Les figures A II.27 à A II.32 présentent des exemples de courbes de comportement en charge des éprouvettes de glace en fonction du déplacement de la traverse de la presse. Ces 6 figures indiquent également les paramètres correspondants à ces essais de cisaillement. Chacune des courbes est représentative d'un des 6 groupes dans lesquels les essais peuvent être inclus. Ces groupes sont formés par chacune des trois zones (ductile, transitoire et fragile) et par les deux modes de confinement de l'éprouvette. À ces zones, qui ont été identifiées au chapitre 2.4.1, correspondent des taux de déformation qui sont qualifiés de lent, intermédiaire ou rapide. La dénomination de ces taux est utilisée dans les figures pour l'identification du groupe de l'essai.

Sur les courbes des essais de cisaillement, le début de la montée en charge n'est pas à la même position sur l'axe du déplacement de la traverse. Cette position correspond au déplacement de la traverse effectué avant qu'elle n'appuie sur le poinçon de l'appareil de cisaillement. Ce déplacement est plus ou moins long suivant la charge de la cellule ou le déplacement de la traverse qui sont utilisés pour le déclenchement de l'acquisition des données par le système informatique.

Dans la plupart des essais, la charge est appliquée sur une distance de déplacement de la traverse supérieure de 0,5 à 0,75 mm à l'épaisseur de l'éprouvette. Le rebord extérieur de la bague d'appui, qui forme la partie supérieure du poinçon, doit traverser complètement l'éprouvette, ce qui nécessite un plus grand déplacement de la traverse. De ce fait, la dernière partie des courbes indique uniquement la valeur de la force qui est nécessaire pour contrer la résistance qui est due au frottement du rebord



de cette bague contre la glace. Dans plusieurs essais, cette partie de la courbe se caractérise par une pente plus abrupte puisque la rupture de l'éprouvette a été complétée. De la même façon, la force nécessaire pour descendre le poinçon comprend la résistance due au frottement du rebord intérieur de la bague qui forme la partie inférieure de la matrice. Après le pic de charge, la plupart des courbes présentent un redressement plus ou moins prononcé qui est dû en partie à ce frottement des composantes du poinçon et de la matrice contre la glace. La modification des caractéristiques de confinement, suite à la déformation importante de l'éprouvette, peut aussi contribuer à ce redressement qui est d'ailleurs plus important dans les essais en confinement partiel. Lors de ces derniers types d'essais, la rupture de l'éprouvette est plus ou moins régulière, et comme il y a peu d'espace libre sur son pourtour, il s'ensuit un tassement de la glace lors de la descente du poinçon. Dans quelques essais, il arrive que la charge appliquée augmente légèrement au cours de ce redressement. La partie descendante des courbes est toutefois secondaire dans l'évaluation des propriétés mécaniques de la glace. Elle présente plus d'intérêt pour déterminer les caractéristiques de fonctionnement de l'appareil de cisaillement.

Dans sa partie ascendante, la courbe de montée en charge ne présente pas de caractéristique particulière qui pourrait indiquer une influence significative de la force de frottement due aux composantes du poinçon et de la matrice. En moyenne, la valeur maximale de chargement est atteinte lorsque le poinçon a parcouru la distance de 0,8 mm. Sur cette distance, puisqu'elle peut se déformer dans l'espace libre formé par le jeu entre le poinçon et la matrice, la glace ne peut exercer d'effort radial important sur le pourtour extérieur du poinçon et celui intérieur de la matrice. Dans ces conditions, la force de friction ne peut pas être très élevée puisqu'elle est proportionnelle à l'effort normal.

### 7.3.2 Caractéristiques des ruptures

À l'emplacement de la rupture, les deux parties des éprouvettes présentent des surfaces relativement planes et légèrement granuleuses. Le plan de rupture est incliné selon la droite qui relie, de part et d'autre du jeu, la bague supérieure du poinçon et celle inférieure de la matrice. La

photographie de la figure A II.25 montre les parties intérieures et extérieures de 3 éprouvettes qui ont été soumises à des essais en confinement total. Généralement, comme pour celle à droite de la photo, la partie intérieure de l'éprouvette demeure fixée sur son segment cylindrique. Le décollement de la glace du segment est plutôt observé lors des essais à taux de déformation rapide. Dans ces types de déformation, les deux parties des éprouvettes sont souvent fracturées en plusieurs endroits.

Lors des essais en confinement partiel, la partie extérieure de l'éprouvette, qui est situé dans la matrice, est brisée en plusieurs morceaux et en particules plus ou moins fines. Ces dernières sont plutôt localisées près de la rupture, dans la partie radiale intérieure de la matrice. Pour plusieurs, elles sont formées après la rupture initiale de l'éprouvette, au cours de la descente du poinçon.

À l'œil nu, la structure superficielle des parties des éprouvettes ne semble pas avoir été altérée pendant l'essai. Lors des manipulations, la glace de chacun des anneaux semble également ne pas être plus fragile qu'avant l'essai. Particulièrement dans les essais à taux de déformation lent, la glace adhère à la bague d'appui supérieure du poinçon et à celle inférieure de la matrice. Dans quelques cas, lors du démontage de l'appareil de cisaillement, l'adhérence de la glace sur les composantes du poinçon et de la matrice semblait aussi solide que celle avec le segment cylindrique sur lequel elle a été formée. Cette adhérence aux composantes de l'appareil est l'indice qu'il y a des mouvements relativement importants de la structure de la glace à l'extérieur de la zone de rupture. D'autre part, ces mouvements sont peut-être localisés près des interfaces et limités au fluage de la glace dans les interstices dus à la rugosité des composantes de l'appareil puisque l'adhérence de la glace est constatée seulement pour les essais lents. En supposant que ce fluage s'effectue de façon graduelle tout au long de l'essai et que la force d'adhésion lui est proportionnelle, cette dernière doit être assez faible pendant la montée en charge parce que le temps pour atteindre le pic de charge est relativement court s'il est comparé à la durée totale de l'essai.

### 7.3.3 Module de cisaillement

Des droites de régression ont été ajustées sur la partie la plus linéaire de la montée en charge de 55 essais. Selon les énoncés du modèle de déformation, les valeurs des pentes de ces droites sont utilisées pour évaluer le module de cisaillement (module de Coulomb) du matériau. Le tableau A I.14 contient, en plus des valeurs du module, les numéros et les paramètres des essais, les pentes et les paramètres statistiques des droites de régression, ainsi que les facteurs de forme et les déplacements du poinçon pour la partie ascendante des courbes. Le facteur de forme indique dans quelle mesure la partie de la courbe qui correspond à la montée en charge s'apparente à la droite de régression. La valeur du facteur de forme est 1 si la droite de régression s'ajuste parfaitement à toute la montée en charge de la courbe. La moyenne des valeurs des facteurs de forme est de 1,90 avec un écart-type de 0,99. Ce facteur est calculé comme suit:

$$f = \frac{m \times D}{F_m} \quad (7.4)$$

Dans laquelle:

$m$  = Pente de la droite de régression (N/m)

$D$  = Déplacement du poinçon jusqu'au pic de charge (m)

$F_m$  = Force maximale au pic de charge (N)

L'équation 2.6 permet de déterminer la valeur du module de cisaillement. Ce module s'exprime ainsi avec les paramètres de l'essai et le comportement en charge de l'éprouvette:

$$G = \frac{m \times J_d}{S \times 2} \quad (\text{Pa}) \quad (7.5)$$

Dans laquelle:

$S$  = Surface de la section de rupture ( $\text{m}^2$ )

$J_d$  = Jeu diamétral entre le poinçon et la matrice (m)

Pour l'ensemble des essais effectués avec un taux de déformation rapide, la moyenne des valeurs du module de cisaillement obtenue est de 2,2 MPa. Cette valeur est de beaucoup inférieure à celle qui a été déterminée dans l'étude de McComber et al. (1990). Dans cette étude, la valeur théorique du module, 1,7 GPa, a été évaluée à l'aide des équations

proposées par Michel (1978). Cette valeur théorique est calculée pour une glace dont la masse volumique est  $852 \text{ kg/m}^3$ , la dimension du grain  $1 \text{ mm}$  et la température  $-10^\circ\text{C}$ . Pour différentes études citées par Lavrov (1971), la valeur moyenne du module de la glace de lac et de rivière est approximativement de  $3,5 \text{ GPa}$ .

Deux facteurs peuvent expliquer les valeurs du module de cisaillement qui sont obtenues à partir des paramètres de mise en charge et des courbes des essais. La différence importante avec les valeurs des autres études peut s'expliquer par le comportement particulier du matériau et par le modèle de déformation qui est utilisé. Le comportement du matériau réfère à sa déformation inélastique lors de la montée en charge. Les déformations sont principalement occasionnées par le fluage et par le tassement de la glace lors de l'appui progressif du poinçon. Même dans le domaine fragile de la glace, où les taux de déformation sont rapides, une part importante du déplacement du poinçon pendant la montée en charge est attribuable à ces phénomènes. Toutefois, le tassement de l'éprouvette n'occasionne pas de variation notable de son épaisseur puisqu'elle est confinée tout au cours de l'essai. Il contribue cependant à surestimer la valeur de la déformation du matériau. Il faut tenir compte que cette action semble plutôt localisée au début de la mise en charge puisque cette partie de la courbe n'est pas linéaire. Cette partie non linéaire de la courbe n'est d'ailleurs pas considérée dans la droite de régression.

D'autre part, selon le modèle utilisé, la déformation du matériau est déterminée en considérant qu'elle se produit uniquement dans l'enceinte du jeu, ce qui contribue également à sous estimer la valeur du module de cisaillement. La figure A II.33 montre, en fonction du taux de déformation et pour chacun des jeux diamétraux et des modes de confinement, le graphique des valeurs des modules de cisaillement des essais qui sont inscrits au tableau A I.14. Ce graphique indique que les valeurs du module de cisaillement varient de façon presque proportionnelle avec les dimensions du jeu. La valeur du module est une caractéristique mécanique du matériau qui est indépendante des paramètres de l'essai. Dans ces conditions, puisqu'il modifie cette valeur, le jeu a peu d'influence sur le comportement de l'éprouvette lors de la

montée en charge. Ainsi, le modèle de déformation n'est pas conforme et l'utilisation du jeu est inadéquate dans la détermination du taux de déformation. Pour une même conclusion, l'équation 7.5 montre qu'il devient impossible d'attribuer une valeur au module de cisaillement lorsque la dimension du jeu est supposée nulle.

Finalement, Lavrov (1969) distingue la valeur du module de cisaillement  $G$  de celle du module de déformation dynamique en cisaillement  $G_{str}$  puisque cette dernière inclut la déformation élastique et permanente du matériau. Ce module de déformation dynamique est dépendant également de la température et de la structure de la glace ainsi que de l'intensité et du temps d'application de la charge. Il caractérise mieux le comportement de la glace sur les différents ouvrages exposés et il est donc plus approprié de l'utiliser dans les calculs en ingénierie.

Des valeurs de  $G_{str}$  variant entre 27 et 84 MPa ont été obtenues par Lavrov avec la méthode du poinçonnage. Ces essais ont été effectués sur des plaques de glace d'eau fraîche à  $-3^{\circ}\text{C}$ . Les écarts sont attribués à l'épaisseur de la glace, au diamètre du poinçon et à la vitesse d'application de la charge. De la même façon, même si la méthode d'évaluation de la déformation est différente, il serait plus approprié de déterminer les valeurs du module de cisaillement du tableau A I.14 comme étant celles du module de déformation en cisaillement  $G_{str}$ . En utilisant la même méthode que Lavrov pour déterminer la déformation de cisaillement du matériau, les valeurs de ce module se situent entre 12 et 73 MPa pour les essais en confinement total et entre 7 et 40 MPa pour ceux en confinement partiel. Ces valeurs sont associées aux essais inscrits au tableau A I.14 et elles sont déterminées ainsi:

$$G_{str} = \frac{\tau_m \times E_e}{C_p} \quad (\text{Pa}) \quad (7.6)$$

Dans laquelle:

$\tau_m$  = Contrainte de cisaillement maximale au pic de charge (Pa)

$C_p$  = Course du poinçon pendant la montée en charge (mm)

$E_e$  = Épaisseur de l'éprouvette (mm)

### 7.3.4 Rigidité de cisaillement brute

La rigidité de cisaillement brute des éprouvettes représente le taux de variation de la contrainte par mètre de déplacement du poinçon. L'évaluation de ce paramètre n'a pas permis de démontrer qu'une part du comportement du matériau pouvait être attribuable au mode de fonctionnement de l'appareil de cisaillement. La similitude avec les courbes des contraintes maximales, qui sera discutée au chapitre suivant, permet plutôt de considérer que l'appareil se comporte adéquatement pour les différentes vitesses de chargement. La valeur de la rigidité du matériau peut être utile en ingénierie dans l'élaboration de différents systèmes mécaniques où la quantité d'énergie doit être optimisée.

La rigidité de cisaillement brute des éprouvettes est déterminée sans considérer la dimension du jeu dans l'équation 7.5 et elle est exprimée à l'aide de la relation qui suit:

$$R = \frac{m}{S} \quad (\text{Pa/m}) \quad (7.7)$$

Dans laquelle:

$m$  = Pente de la droite de régression (N/m)

$S$  = Surface de la section de rupture ( $\text{m}^2$ )

Le graphique de la figure A II.34 montre les valeurs de la rigidité de cisaillement brute des éprouvettes en fonction du taux de déformation. Les fonctions analytiques, leurs paramètres statistiques ainsi que les courbes correspondantes sont données sur cette figure pour chacun des modes de confinement. Le logiciel EXCEL est utilisé pour déterminer les coefficients du modèle et pour la présentation graphique. Le lissage des courbes est effectué par la méthode des moindres carrés. Quoiqu'il soit quand même représentatif, le modèle de lissage est moins approprié à la distribution des valeurs de la rigidité pour les essais en confinement partiel. D'autres détails sur le modèle utilisé ainsi que sur les paramètres statistiques sont donnés au chapitre suivant.

Dans le mode de confinement total, la rigidité augmente toujours avec l'accroissement du taux de déformation et elle atteint 7,5 GPa/m au taux maximum de déformation de 40  $\text{s}^{-1}$ . Dans ce mode, la réaction du matériau va de pair avec l'action, plus cette dernière est rapide plus la

montée en charge est abrupte. C'est ce qui est observé également pour les essais en confinement partiel dans la zone de comportement ductile du matériau. Dans cette zone les valeurs de la rigidité se superposent à celles de l'autre mode de confinement. Dans la zone de transition, la rigidité atteint un maximum de 5 GPa/m vers  $0,03 \text{ s}^{-1}$  de taux de déformation, par la suite elle diminue rapidement jusqu'à 1 GPa/m. Dans la zone fragile, le matériau présente un comportement inverse, plus l'action est rapide moins la réaction est grande.

Pour tous les essais du tableau A I.14, la figure A II.35 montre les valeurs des déplacements du poinçon en fonction du taux de déformation pour toute la montée en charge. Les fonctions analytiques, les paramètres statistiques ainsi que les courbes correspondantes sont également inscrits sur cette figure. Pour les essais lents, dont les taux sont inférieurs à  $0,001 \text{ s}^{-1}$ , le déplacement du poinçon est approximativement de 0,8 mm et il est identique dans les deux modes de confinement. Pour les essais rapides, le déplacement moyen du poinçon n'est que de 0,34 mm pour le confinement partiel, comparativement à 1,19 mm dans le confinement total. Selon les courbes obtenues dans chacun des modes de confinement, les déplacements du poinçon se stabilisent autour de ces valeurs pour les taux élevés de déformation. En confinement total, l'augmentation du déplacement du poinçon avec le taux de déformation s'explique par les valeurs des contraintes maximales qui augmentent plus rapidement que celles de la rigidité. En confinement partiel, pour des taux de déformation jusqu'à  $0,01 \text{ s}^{-1}$ , l'augmentation des contraintes maximales est relativement faible, ce qui se traduit par une diminution de la course du poinçon même si la rigidité augmente sur toute cette partie du comportement ductile du matériau. Au-delà de cette valeur du taux de déformation, la diminution importante des contraintes maximales implique également une diminution de la course du poinçon puisque la rigidité du matériau ne diminue pas dans la même proportion.

En confinement partiel, les deux valeurs maximales du déplacement du poinçon, qui correspondent aux essais numéro 113 et 114, ne sont pas considérées pour le lissage. Pour ces essais, à la différence des autres comportements, la rupture des éprouvettes ne s'est pas effectuée de façon

franche mais plutôt par une suite de petites ruptures qui ont précédé le pic de chargement. Ces essais ont d'ailleurs des valeurs élevées de leur facteur de forme. Finalement, compte tenu de leur dispersion, le modèle s'ajuste moins bien aux valeurs du déplacement du poinçon pour les essais en confinement total.

La figure A II.36 montre les valeurs de la rigidité en fonction de la vitesse de déplacement du poinçon. En comparant cette figure avec celle A II.34, la disposition graphique des valeurs n'est pas beaucoup modifiée par les dimensions du jeu qui sont utilisées pour déterminer les taux de déformation. Même si le jeu ne permet pas de déterminer les valeurs des taux de déformation qui correspondent aux comportements réels des éprouvettes, il demeure un paramètre important de la configuration de l'appareil de cisaillement. Pour cette raison, le taux de déformation est utilisé de préférence à la vitesse de déplacement du poinçon puisqu'il fait intervenir ce paramètre. Il contribue également à démarquer les valeurs sur les graphiques.

### 7.3.5 Courbes des contraintes maximales

Selon les dimensions des jeux et les épaisseurs des éprouvettes, les figures A II.37 à A II.41 montrent, en fonction du taux de déformation, les distributions des valeurs des contraintes maximales obtenues pour tous les essais effectués en confinement total. De la même façon, les figures A II.42 à A II.44 montrent les distributions pour les essais en confinement partiel. La fonction analytique qui est associée à chacune de ces distributions et la courbe qui lui correspond sont également données sur ces figures. En incluant les courbes du chapitre précédent, le modèle est le même et il est linéarisable par rapport à ses coefficients. Le modèle transformé a la forme d'une équation polynomiale de degré 2.

$$\hat{y} = a \ln(x)^2 \times b \ln(x) \times c \quad (7.8)$$

Les valeurs des paramètres statistiques  $r^2$ ,  $F_0$  et l'indice  $F$ , qui caractérisent la justesse et l'exactitude du modèle, sont aussi inscrits sur les figures.

Dans l'ensemble, le modèle utilisé est approprié et représente bien les distributions des valeurs des contraintes. Il est cependant plus adéquat



pour les essais en confinement total puisque les valeurs sont moins dispersées. Dans ce mode, pour les essais effectués avec un jeu de 0,43 mm (figure A II.37), le modèle est moins bien ajusté puisque les valeurs sont regroupées de part et d'autre de la courbe. C'est pourquoi l'indice  $F$ , qui doit être préférablement inférieur à 2, est relativement élevé. De façon moins importante, la même chose est observée pour les essais effectués avec des jeux de 0,75 et de 2,19 mm en confinement partiel. D'autre part, avec un niveau de confiance à 99%, les valeurs du coefficient  $r^2$  ne sont pas le fruit du hasard puisque les indices statistiques  $F_0$  de chacun des lissages sont supérieurs à ceux de la table  $F$ .

La figure A II.45 représente la superposition des courbes de lissage des contraintes maximales de chaque configuration d'essais. Pour les essais effectués en confinement total avec un jeu de 0,75 mm, les courbes sont plus prononcées avec l'augmentation de l'épaisseur de l'éprouvette. Quoique cette caractéristique puisse être un indice de la relation entre l'épaisseur des éprouvettes et la valeur maximale des contraintes de cisaillement, elle ne permet pas de le conclure puisque les distinctions sont très faibles. Les figures A II.37 et A II.43 ne montrent pas non plus cette relation car les épaisseurs des éprouvettes ne se démarquent pas dans ces distributions des valeurs des contraintes.

Toujours sur la figure A II.45, pour les essais effectués avec un jeu de 2,19 mm, les courbes des lissages se démarquent et présentent des particularités qui peuvent être attribuées à une influence de la dimension du jeu sur les valeurs des contraintes. En confinement total la courbe des contraintes est inversée par rapport aux autres et, en confinement partiel, la courbure du lissage est beaucoup moins prononcée tout en indiquant des valeurs des contraintes qui sont plus faibles que pour celles obtenues avec les autres jeux. Ces différences ne sont pas très importantes, mais elles indiquent néanmoins que les dimensions du jeu ne peuvent pas varier considérablement sans modifier le comportement des éprouvettes. Finalement, il faut considérer que la position des valeurs des contraintes sur les figures n'est pas indépendante des dimensions du jeu, ces dernières dimensions étant contenues dans celles du taux de déformation.

La figure A II.46 contient les courbes de régression de toutes les valeurs des contraintes obtenues dans chacun des deux modes de confinement. En confinement partiel, pour les faibles taux de déformation, lorsque la glace présente un comportement ductile, les valeurs des contraintes maximales sont sensiblement les mêmes que dans le confinement total. Par la suite, dans la zone de transition, les valeurs des contraintes maximales varient peu et passent par un maximum d'environ 1,3 MPa vers le taux de déformation de  $0,01 \text{ s}^{-1}$ . Au-delà du taux de  $0,05 \text{ s}^{-1}$ , les valeurs des contraintes diminuent rapidement avec l'augmentation du taux de déformation, elles ne sont plus que de 0,3 MPa au taux maximum de  $40 \text{ s}^{-1}$ . En confinement total, les contraintes maximales augmentent continuellement et atteignent 8 MPa au taux maximum. Dans ce mode de déformation, la glace a un comportement uniquement ductile pour tous les taux de déformation utilisés. Il faut distinguer les comportements ductile et fragile de la glace de ceux utilisés pour les métaux. Dans le cas de la glace, le comportement est défini en considérant la distribution des contraintes maximales plutôt que la déformation à la rupture du matériau.

Les variations des valeurs des contraintes maximales en fonction du taux de déformation sont assez similaires à celles de la rigidité de cisaillement brut. Les courbes des figures A II.34 et A II.46 montrent les mêmes configurations. Dans les essais en confinement total, toutes proportions gardées avec les contraintes maximales, la rigidité augmente moins rapidement avec l'augmentation du taux de déformation. En confinement partiel, dans la zone de comportement ductile, c'est l'inverse qui est observé. Par contre, la rigidité diminue plus rapidement que les contraintes maximales dans la zone de comportement fragile de la glace. C'est dans la zone de transition ductile-fragile et pratiquement pour la même valeur de taux de déformation que les contraintes maximales et la rigidité passent par un maximum.

## CHAPITRE 8

### VALIDITÉ DES RÉSULTATS

#### 8.1 COMPARAISON AVEC D'AUTRES TYPES D'ESSAIS

Les résultats de quelques essais de traction effectués dans l'étude de Tremblay (1991) sont présentés à la figure A II.47. Les deux types d'éprouvettes, avec et sans collecteur, utilisées dans ces essais, ont été présentés précédemment au chapitre 1.4.2. Les lissages de chacune des distributions des valeurs des contraintes maximales sont effectués à l'aide du modèle de l'équation 7.8. De même, la figure A II.48 présente les distributions des valeurs des contraintes maximales en fonction du taux de déformation pour des essais de traction et de compression qui ont été effectués dans l'étude de Druez et al. (1987). Pour certains essais de ces deux figures, les paramètres atmosphériques de formation de la glace, la teneur en eau et la vitesse de l'air, sont différents dans une même distribution des valeurs des contraintes maximales. Ces valeurs ont tout de même été associées puisqu'elles sont assez regroupées. Les valeurs des paramètres atmosphériques utilisées sont indiquées sur les figures.

La figure A II.49 présente la superposition des courbes de lissage des deux figures précédentes avec celles des contraintes maximales des essais de cisaillement de la figure A II.46. Exception faite des essais en confinement total, le comportement de la glace est semblable dans les trois types d'essais mécaniques. Dans chacun, les courbes ont presque la même configuration et la résistance mécanique de la glace passe par un maximum avec l'augmentation du taux de déformation. Pour les essais en cisaillement, la résistance maximale est environ la moitié de celle en traction et elle est sept fois plus faible comparée à celle obtenue en compression. Les vitesses maximales de déformation, utilisées lors des essais en confinement total, n'ont pas permis d'obtenir des valeurs des

contraintes maximales supérieures à celles qui ont pu être mesurées dans les essais de compression.

Finalement, en respectant les valeurs relatives des contraintes maximales et sans tenir compte du taux de déformation, la figure A II.50 montre la superposition des courbes lorsque celles des essais de cisaillement sont décalées sur l'abscisse. Cette superposition montre de façon plus évidente la corrélation entre les comportements du matériau pour chacun des types d'essais. Par l'orientation des courbes, le comportement en confinement total s'apparente à celui du domaine ductile des essais en traction et en compression. Également, l'orientation des courbes des essais en traction et en compression semble indiquer, tout comme ce qui est observé dans le comportement ductile de la glace de lac ou de rivière, que les contraintes maximales se superposent au faible taux de déformation.

## 8.2 AUTRES TECHNIQUES DE CISAILLEMENT

Les travaux effectués par Jellinek (1962), sur la détermination de l'adhésion en cisaillement de la glace ordinaire présentent un aspect intéressant dans la façon d'exprimer les déformations appliquées au matériau. L'essai d'adhésion consistait à déplacer longitudinalement deux plaques qui étaient retenues l'une à l'autre par de la glace d'une épaisseur de 1 cm. Les contraintes d'adhésion de la glace obtenues à l'aide de cette technique sont exprimées en fonction de la vitesse de déformation, en cm/sec, qui est appliquée. En considérant que la glace est déformée uniformément entre les deux plaques, il s'avère que la valeur de la vitesse relative de déplacement des plaques est identique au taux de déformation de la glace. Cette particularité pourrait également être utilisée pour exprimer le taux de déformation dans les essais de cisaillement. Il suffit que la valeur du jeu radial entre le poinçon et la matrice soit de 1 mm et que le déplacement du poinçon soit exprimé en mm/s.

Cité par Lavrov (1969), S.S. Vyalov a obtenu, sur de la glace ordinaire à  $-3^{\circ}\text{C}$ , des valeurs se situant entre 0,6 et 3 MPa pour les contraintes maximales en cisaillement. Pour les mêmes raisons que Lavrov, qui ont été présentées au chapitre 7.2.3, les écarts sont attribués à

l'épaisseur de la glace, au diamètre du poinçon et au temps d'application de la charge. La technique du poinçonnage a également été utilisée pour réaliser ces essais de cisaillement et la méthode de calcul de la contrainte est la même que celle de la présente étude. En comparaison, les résultats obtenus en confinement partiel se situent entre 0,3 et 1,7 MPa.

La méthode, utilisée par Saeki (1985), pour le cisaillement de la glace de mer, consiste à sectionner transversalement un cylindre de glace qui est placé dans une enceinte verticale de même diamètre. La partie supérieure de l'enceinte se déplace, dans la direction radiale, sur l'autre qui est maintenue fixe. Des charges verticales peuvent être ajoutées sur le cylindre de glace. Dans ces essais, la déformation de cisaillement est exprimée par la relation entre la vitesse de déplacement de la partie supérieure et le côté d'une section carrée équivalente à celle du cylindre de glace. Quoique dans cette étude la variation des contraintes de cisaillement soit moins prononcée que pour celle obtenue en confinement partiel, les résultats montrent également le même comportement. La contrainte est maximale au taux de cisaillement de  $0,001\text{ s}^{-1}$  et elle vaut approximativement 1,3 MPa.

### 8.3 MÉTHODE DES ÉLÉMENTS FINIS

Le but de la modélisation par éléments finis réalisée dans cette étude est de visualiser la distribution des contraintes à l'intérieur du matériau et d'obtenir leurs valeurs relatives. Le modèle considère le déplacement imposé d'une section du matériau supposé parfaitement élastique. Ce modèle peut être représentatif des sollicitations imposées aux différentes parties de l'éprouvette au début de l'essai de cisaillement. Par la suite, le comportement viscoplastique de la glace modifie de façon importante ces sollicitations.

La méthode des éléments finis consiste à calculer, à l'aide de fonctions mathématiques approximatives, les réactions des mailles qui subdivisent un élément pour rendre compte du comportement global du système physique. Dans ce cas-ci, l'algorithme de calcul s'effectue à l'aide du logiciel de modélisation et de simulation ALGOR. Cette version

du logiciel est compatible avec le système d'exploitation DOS. Les principales étapes sont:

- 1) Définir la géométrie de l'élément.
- 2) Définir le maillage de l'élément.
- 3) Déterminer les conditions frontières.
- 4) Attribuer les degrés de liberté à chacun des noeuds.
- 5) Déterminer les propriétés du matériau.
- 6) Solutionner les équations matricielles.

La méthode est utilisée pour déterminer la distribution des déplacements et des contraintes à l'intérieur d'un élément de l'éprouvette de glace atmosphérique lorsqu'elle est soumise à des conditions frontières qui tendent à la cisailer. Cet élément est le même que celui de l'éprouvette situé du côté droit de la figure 3.1. Il consiste en une section plane orientée dans la direction de l'axe de l'éprouvette. La partie supérieure de la section en contact avec le poinçon est déplacée de 0,01 unité dans la direction de l'axe Z. À la base du poinçon, la section est limitée à un déplacement maximal de même grandeur. Le maillage de l'élément est bidimensionnel et il est situé dans le plan YZ pour les besoins du logiciel. La simulation est effectuée en mode axisymétrique. Sauf pour la masse volumique, les propriétés de l'élément de glace atmosphérique sont considérées similaires à celles de la glace de lacs et de rivières. Les valeurs sont:

Masse volumique,	850 kg/m <sup>3</sup>
Module de Young,	$E = 9,9 \times 10^9 \text{ Pa}$
Coefficient de Poisson,	$\nu = 0,33$
Module de cisaillement,	$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \text{ Pa}$

La figure A II.51 indique le maillage utilisé ainsi que les isodéplacements sur toute la section de l'élément. Le déplacement réel imposé au poinçon est de 2  $\mu\text{m}$  et il est amplifié 500 fois à l'échelle de la figure. Le maillage est carré et a une dimension de 0,2 mm de côté, il subdivise une éprouvette de 10 mm d'épaisseur. Les conditions frontières du modèle s'apparentent à celles des essais en confinement total. Les

figures A II.52 et A II.53 représentent respectivement les isodéplacements vectoriels dans les directions des axes  $Z$  et  $Y$ . Le modèle indique un déplacement maximum selon l'axe  $Y$  qui est environ le tiers de celui exercé dans la direction de l'axe  $Z$ .

Les figures A II.54, A II.55, A II.56 et A II.57 montrent les isocontraintes des termes du tenseur qui sont induites par le déplacement imposé à l'élément. Le tenseur des contraintes est symétrique et les termes  $S_{13}$  et  $S_{23}$  ont comme valeur zéro en tout point du modèle. Les contraintes normales, notées  $S_{11}$ ,  $S_{22}$  et  $S_{33}$  dans ce logiciel sont inférieures à 10 MPa en compression et à 1,3 MPa en tension. Pour les contraintes de cisaillement, elles varient entre  $-0,86$  et  $2,64$  MPa. Le tenseur s'exprime de la façon suivante:

$$\vec{\sigma} = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{21} & S_{31} \\ S_{12} & S_{22} & S_{32} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} \end{vmatrix} \quad (8.1)$$

Les figures A II.58 et A II.59 montrent respectivement les contraintes principales maximum et minimum. Les premières varient entre  $2,1$  et  $-5,8$  MPa, les secondes entre  $0,24$  et  $-10$  MPa. Les valeurs des contraintes en compression sont relativement importantes. Les plus hautes valeurs sont cependant très localisées et situées de part et d'autre du jeu sur l'appui supérieur du poinçon et sur celui inférieur de la matrice.

Finalement, la figure A II.60 représente les valeurs des contraintes de von Mises. Les valeurs se situent entre  $0,03$  et  $8,4$  MPa. Sur la plus grande surface de la section, la distorsion est relativement faible. Cette dernière est plutôt importante aux extrémités du poinçon et de la matrice qui ont été identifiées précédemment. Les isocontraintes indiquent que la zone de sollicitation importante est orientée dans la direction de ces extrémités des composantes de l'appareil de cisaillement.

## CHAPITRE 9

### RECOMMANDATIONS

Afin de pouvoir évaluer plus en détail l'influence de l'appareil sur le comportement de la glace, des essais complémentaires pourraient être effectués:

— Des essais pourraient être effectués sur de la glace atmosphérique obtenue sous différentes conditions de formation. Les résultats de ces essais seraient utiles pour évaluer plus particulièrement le comportement mécanique du matériau en fonction des quatre paramètres atmosphériques.

— Des essais, avec un jeu entre le poinçon et la matrice qui serait nul ou légèrement négatif, permettraient de vérifier le comportement du matériau lorsqu'une section de l'éprouvette est soumise plus directement à des efforts de compression. Ces essais permettraient de vérifier dans quelle mesure les valeurs des contraintes maximales diffèrent de celles obtenues avec un jeu positif. Le jeu négatif est produit en utilisant, pour la bague d'appui supérieure du poinçon, un diamètre qui est plus grand que celui de la bague inférieure de la matrice. Évidemment, ces essais doivent être interrompus après que le pic de chargement a été atteint.

— Lors du montage dans l'appareil, une précharge peut également être appliquée sur l'éprouvette par l'intermédiaire des bagues d'appui du poinçon et de la matrice. Ces essais avec précharge, effectués par l'intermédiaire des bagues, pourraient permettre de vérifier la relation entre le confinement et le comportement de la glace. Par exemple, il serait intéressant de déterminer dans quelle mesure ces précharges font varier les valeurs des contraintes maximales, ce qui pourrait permettre d'améliorer la technique d'assemblage des composantes du poinçon et de la matrice.



— L'utilisation d'un plus grand diamètre extérieur de la matrice permettrait d'effectuer des essais de cisaillement sur des éprouvettes également de plus grand diamètre. Ces éprouvettes pourraient aussi ne pas être usinées sur leur pourtour. Ces essais effectués en confinement partiel pourraient contribuer à déterminer la relation entre les valeurs des contraintes maximales et le diamètre extérieur de l'éprouvette.

— Une précharge peut également être appliquée sur le poinçon pendant un temps déterminé avant l'essai de cisaillement. Cette précharge peut être enlevée avant l'essai ou demeurer en place sur l'éprouvette. L'influence des précharges sur les valeurs de la rigidité et de la contrainte maximale du matériau, peuvent contribuer à caractériser le fonctionnement de l'appareil de cisaillement.

— Des essais de cisaillement sur des éprouvettes de glace ordinaire apporteraient un complément d'information sur les performances de l'appareil. Les résultats de ces essais permettraient en quelque sorte de calibrer l'appareil puisque le comportement mécanique de la glace ordinaire est mieux connu que celui de la glace atmosphérique.

— Pour mettre en évidence l'effet du mode de confinement sur la répartition des contraintes, il serait utile d'effectuer une analyse par éléments finis en mode de confinement partiel.

Finalement, un mode de confinement ne peut être proposé de préférence à l'autre. Chacun contribue à distinguer le comportement du matériau dans des conditions particulières. Le comportement observé en mode de confinement partiel s'apparente probablement plus à celui de la glace soumise à un effort en cisaillement sur un câble ou sur une composante mécanique fixe ou mobile. En confinement total, le comportement peut être représentatif de celui de la glace qui se forme entre des pièces mécaniques. Lorsqu'une pièce est en mouvement, la glace peut être plus ou moins emprisonnée et elle peut présenter un comportement qui s'apparente à celui observé dans le mode d'essai de cisaillement en confinement total.

## CONCLUSION

D'après l'ensemble des résultats obtenus, il s'avère que l'appareil de cisaillement est approprié pour déterminer cette résistance mécanique pour la glace atmosphérique. Quoiqu'il nécessite l'utilisation de plusieurs composantes, cet appareil demeure tout de même simple d'utilisation. Il présente également l'avantage de permettre la mise en charge sur une forme d'éprouvette qui est relativement facile à produire. Les éprouvettes peuvent même être formées avec d'autres types de glace ou de matériaux à comportement mécanique particulier.

Développés dans la cadre de cette étude, les systèmes d'acquisition et de contrôle de la vitesse de l'air dans la soufflerie ont permis de constater que des variations importantes se produisent tout au long de la formation du manchon. Ces variations, qui sont occasionnées par la formation de glace sur les composantes de la soufflerie, contribuent à augmenter les écarts autour des valeurs cibles des paramètres atmosphériques.

Les regroupements des valeurs des contraintes maximales obtenues avec les mêmes paramètres d'essai montrent que l'appareil permet de reproduire les mesures avec une bonne exactitude. Le comportement du matériau soumis aux essais en confinement partiel est semblable à celui observé pour les essais en compression et en tension. Pour le confinement total, les résultats s'apparentent beaucoup à un comportement ductile en compression. Les résultats des essais ont permis de constater que les valeurs des contraintes maximales, mesurées en fonction de la vitesse de déformation, varient de façon presque proportionnelle avec celles de la rigidité de cisaillement brute de l'éprouvette. Ce comportement du matériau est observé dans les domaines ductile et fragile. Les valeurs maximales sont observées dans la région transitoire entre ces deux domaines.

D'autre part, l'utilisation de différentes valeurs du jeu entre le poinçon et la matrice a permis de montrer que ce paramètre ne peut pas être considéré pour déterminer le taux de déformation qui est appliqué sur l'éprouvette. La dimension du jeu a cependant une influence sur les valeurs des contraintes maximales. Ces dernières tendent à diminuer lorsque la dimension du jeu dépasse 2 mm. De plus, pour des écarts qui atteignent jusqu'à 4 mm, l'épaisseur de l'éprouvette n'occasionne pas de variation de la contrainte maximale de cisaillement.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAIN, M., et J. F. GAYET**, 1983, – "*Étude de l'accrétion de la glace atmosphérique. I- Comparaison et analyse des résultats expérimentaux et des prévisions du modèle de LOZOWSKI et al. (1979), II- Modélisation numérique avec paramétrisation de la variation de la masse spécifique du givre en fonction de la position angulaire sur un cylindre*", Journal de Recherches Atmosphériques, no 4, vol. 17, pp. 281-311.
- BAZERGUI, A., T. BUI-QUOC, A. BIRON, G. McINTYRE et C. LABERGE**, 1987, — "*Résistance des matériaux*", École Polytechnique de Montréal.
- DORLOT, J.-M., J.-P. BAÏLON et J. MASOUNAVE**, 1986, – "*Des matériaux*", Deuxième édition, École Polytechnique de Montréal.
- DRUEZ, J., J. CLOUTIER et L. CLAVEAU**, 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., J. LAFLAMME and P. McCOMBER**, 1991, – "*Mt Valin In-Cloud Icing Studies*", Canadian Electrical Association, Line security and ice accretion subsection transmission section, Engineering and operating division, may, 12 p..
- DRUEZ, J., J.-L. LAFORTE and D. D. NGUYEN**, 1984, – "*Mechanical Properties of Atmospheric Ice*", Proceedings of Second International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Trondheim (Norway), June 19-21, pp. 51-56.

- DRUEZ, J., P. McCOMBER and Y. LAVOIE**, 1986, – "*Compressive Strength Measurements on Atmospheric Ice*", Proceedings of Third International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Vancouver (B. C.), Canada, May 6-8, paper 5-1, 6 p..
- DRUEZ, J., P. McCOMBER and C. TREMBLAY**, 1989, – "*Experimental Results on the Tensile Strength of Atmospheric Ice*", Transactions of CSME, Volume 13, Number 3, pp. 59-64.
- DRUEZ, J., D. D. NGUYEN et Y. LAVOIE**, 1985, – "*Résistance à la compression de la glace atmosphérique*", Proceedings of Tenth Canadian Congress of Applied Mechanics, The University of Western Ontario, London, June 2-7, pp. 339-340.
- DRUEZ, J., D. D. NGUYEN and Y. LAVOIE**, 1986, – "*Mechanical Properties of Atmospheric Ice*", Cold Regions Science and Technology J., Volume 13, pp. 67-74.
- DRUEZ, J., C. L. PHAN, J.-L. LAFORTE and D. D. NGUYEN**, 1978, – "*The Adhesion of Glaze and Rime on Aluminium Electrical Conductors*", Transactions. CSME, Volume 5, Number 4, pp. 215-220.
- GODARD, S.**, 1960, – "*Mesure des gouttelettes de nuage avec un film de collargol*", Bull. Obsv. Puy de Dôme, Numéro 2, pp. 41-46.
- HORJEN, I.**, 1983, – "*Icing on Offshore Structure-Atmospheric Icing*", Norwegian Maritime research, No. 3, pp. 9-22.
- HOUSNER, G. W., and T. JR. VREELAND**, 1966, – "*The Analysis of Stress and Deformation*", The MacMillan Company, New York.
- JELLINEK, H. H. G.**, 1962, – "*Ice Adhesion*", Canadian Journal of Physics, Volume 40, pp. 1294-1309.
- KACZMAREK, E.**, 1964, – "*Pratique des travaux à la presse*", Dunod, Paris.
- KUEHN, G. A., E. M. SCHULSON, D. E. JONES and J. ZHANG**, 1993, – "*The Compressive Strength of Ice Cubes of Different Sizes*", Transactions of ASME, Volume 115, pp. 142-148.

- KUROIWA, D.**, 1965, – "*Icing and Snow Accretion on Electric Wires*", Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Research Report 123, Hanover, New Hampshire, U.S.A., 10 p..
- LAFORTE, J.-L., C. L. PHAN and B. FELIN**, 1983, – "*Microstructure of Ice Accretions Grown on Aluminum Conductors*", Journal of Climate and Applied meteorology, Volume 22, No. 7, July, pp. 1175-1189.
- LAFORTE, J.-L., C. L. PHAN, B. FELIN and R. MARTIN**, 1982, – "*Adhesion of Ice on Aluminum Conductor and Crystal Size in the Surface Layer*", Proceedings of First International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Hanover, New Hampshire, U.S.A., pp. 83-91.
- LAFORTE, J.-L.**, Automne 1992, – "*Technogénie de l'environnement nordique*", Notes de cours 6MIG918-11, Université du Québec à Chicoutimi, Département des sciences appliquées.
- LANGMUIR, I. and K. B. BLODGETT**, 1946, – "*A Mathematical Investigation of Water Droplet Trajectories*", USAF Technical Report. 5418.
- LAVROV, V. V.**, 1969, – "*Deformation and Strength of Ice*", Hydrometeorology Publications House, Leningrad, U.S.S.R. Translation by Israel Program for Scientific Translations Ltd., IPST Cat. No. 5824.
- LOUCHEZ, P. R.**, 1992, – "*Modélisation et simulation*", Notes de cours 6MIG802, Université du Québec à Chicoutimi, Département des sciences appliquées.
- LOUCHEZ, P. R.**, Hiver 1988, – "*Résistance des matériaux*", Notes de cours 6GEN231, Université du Québec à Chicoutimi, Département des sciences appliquées, Module de Génie unifié.
- LOZOWSKI, E. P., J. R. STALLABRASS and P. F. HEARTY**, 1979, – "*The Icing of an Unheated, Non-Rotating Cylinder in Liquid Water Droplet-Ice Crystal Clouds*", National Research Council of Canada, Division of Mechanical Engineering, Technical Report LTR-LT-96, 61 p..

- MACKLIN, W. C.**, 1962, – "*The Density and Structure of Ice Formed by Accretion*", Quarterly Journal of Royal Meteorological Society, Volume 88, pp 30-50.
- MAKKONEN, L. J., and J. R. STALLABRASS**, 1984, – "*Ice Accretion on Cylinders and Wires*", National Research Council of Canada, Division of Mechanical Engineering, Technical Report TR-LT-005, NRC No. 23649, 43 p..
- MAKKONEN, L. J., and J. R. STALLABRASS**, 1987, – "*Experiments on the Cloud Droplet Collision Efficiency of Cylinders*", Journal of Climate and Applied meteorology, Volume 26, pp. 1406-1411.
- McCOMBER, P., and G. TOUZOT**, 1981, – "*Calculation of the Impingement of Cloud Droplets on a Cylinder by the Finite Element Method*", Journal of the Atmospheric Sciences, 38, pp. 1027-1036.
- McCOMBER, P., J. DRUEZ and M. ST-LOUIS**, 1990, – "*Effects of Cable Twisting on Atmospheric Ice Shedding*", International Workshop of Atmospheric Icing of Structures, Tokyo, Octobre, pp A8.1-A8.6.
- MELLOR, M.**, 1979, – "*Mechanical Properties of Polycrystalline Ice*", International Union of Theoretical and Applied Mechanics, Physics and mechanics of ice, Copenhagen, Août, pp 217-245.
- MICHEL, B.**, 1978, – "*Ice Mechanics*", Les presses de l'Université Laval, Québec.
- MINSK, L. D.**, 1980, – "*Icing on Structures*", Cold Regions Research & Engineering Laboratory, Research Report 80-31, Hanover, New Hampshire, U.S.A., 22 p..
- NADREAU, J.-P., and B. MICHEL**, 1984, – "*Ice Properties in Relation to Ice Forces*", IAHR ice symposium, Hamburg, pp. 63-115.
- NADREAU, J.-P., et B. MICHEL**, 1987, – "*Courbe intrinsèque de la glace en compression*", Journal de physique, Colloque C1, Supplément au No. 3, Tome 48, pp. C1 321-C1 327.

- PERSONNE, P.**, 1988, – "*Effet de la rugosité sur la croissance du givre à faible vitesse: Résultats expérimentaux et modélisation*", Thèse présentée à l'Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand II) pour l'obtention du grade de docteur ès sciences, 232 p..
- PHAN, C. L., P. McCOMBER and A. MANSIAUX**, 1976, – "*Adhesion of Rime and Glaze on Conductors Protected by Various Materials*", Transactions of CSME, Volume 4, Number 4, pp. 204-208.
- POLAKOWSKI, N. H., and E. J. RIPLING**, 1966, – "*Strength and Structure of Engineering Materials*", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J..
- PUTOT, C.**, 1987, – "*Comportement mécanique de la glace - Mécanismes de l'interaction glace/ouvrages en mer*", Revue de l'institut français du pétrole, Volume 42, No 3, mai-juin, pp. 347-373.
- RUSH, C. K., and R. L. WARDLAW**, 1957, – "*Icing Measurements with a Single Rotating Cylinder*", Laboratory report LR-206, National Aeronautical Establishment, Ottawa, Canada.
- SCHEY, J. A.**, 1984, – "*Tribology in Metalworking, Friction, Lubrification and Wear*", American Society for metals.
- SAEKI, H., T. ONO, N. ZONG and N. NAKAZAWA**, 1985, – "*Experimental Study on Direct Shear Strength of Sea Ice*", International Glaciological Society, Annals of Glaciology, No 6.
- TREMBLAY, C.**, 1991, – "*Détermination de la résistance à la traction de la glace atmosphérique*", Mémoire présenté à l'Université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la maîtrise en ressources et systèmes, 65 p..



## **ANNEXE I**

**Tableau A I.1:** Vitesse de l'air en fonction de l'ouverture des ailettes restrictives.

Position des ailettes	Point <i>a</i>		Point <i>b</i>		Point <i>c</i>		Point <i>d</i>	
	Pression en pouce d'eau	Vitesse en m/s	Pression en pouce d'eau	Vitesse en m/s	Pression en pouce d'eau	Vitesse en m/s	Pression en pouce d'eau	Vitesse en m/s
1	0.04	3.9	0.04	3.9	0.04	3.9	0.04	3.9
2	0.06	4.8	0.06	4.8	0.06	4.8	0.06	4.8
3	0.1	6.2	0.11	6.5	0.1	6.2	0.11	6.5
4	0.15	7.6	0.15	7.6	0.14	7.3	0.16	7.8
5	0.19	8.5	0.2	8.7	0.18	8.3	0.21	9.0
6	0.25	9.8	0.26	10.0	0.24	9.6	0.26	10.0
7	0.31	10.9	0.33	11.2	0.3	10.7	0.33	11.2
8	0.41	12.5	0.43	12.8	0.38	12.1	0.44	13.0
9	0.53	14.2	0.55	14.5	0.49	13.7	0.57	14.8
10	0.63	15.5	0.67	16.0	0.6	15.1	0.68	16.1
11	0.73	16.7	0.77	17.2	0.69	16.2	0.79	17.4
12	0.83	17.8	0.87	18.2	0.79	17.4	0.89	18.4
13	0.92	18.7	0.95	19.1	0.86	18.1	0.97	19.3
14	1.02	19.7	1.07	20.2	0.96	19.2	1.09	20.4
15	1.14	20.9	1.19	21.3	1.07	20.2	1.25	21.9
16	1.18	21.2	1.25	21.9	1.11	20.6	1.28	22.1

— L'emplacement de chacun des points est indiqué sur la figure 4.2.

**Tableau A I.2:** Vitesses de l'air sur un axe vertical passant par le point *a* pour 4 collecteurs.

Points de lecture	Sans collecteur	Diamètre des collecteurs			
		30.4 mm	48 mm	60 mm	80 mm
<i>e</i>	non relevée	13.7	14.0	14.1	13.7
<i>f</i>	non relevée	13.9	14.0	14.0	13.9
<i>a</i>	14.5	14.0	14.0	14.0	14.0
<i>g</i>	non relevée	14.0	14.0	13.8	14.0
<i>h</i>	non relevée	13.8	14.2	14.0	13.8

— La vitesse a été préalablement ajustée, sans collecteur, à 14,5 m/s.

— La position des points est indiquée sur la figure A II.3.

**Tableau A I.3: Valeurs des pressions et des vitesses mesurées pendant la formation des manchons utilisés pour fabriquer les éprouvettes.**

Numéro du manchon	Buse de pulvérisation		Soufflerie			
	Pression moyenne de l'air (kPa)	Pression moyenne de l'eau (kPa)	Vitesse moyenne de l'air (m/s)	Vitesse maximale de l'air (m/s)	Vitesse minimale de l'air (m/s)	Vitesse asservie
1	152	121	16.0	18.5	14.2	Oui
2	152	122	16.0	18.5	14.5	Oui
3	152	121	16.2	19.0	14.2	Oui
4	151	122	16.1	18.5	14.2	Oui
5	151	122	15.8	19.5	11.5	Non
6	151	122	15.9	18.5	14.5	Oui
7	151	121	16.2	19.7	12.3	Non
8	152	122	15.4	17.9	12.7	Non
9	152	123	16.1	20.0	17.8	Oui
10	150	121	16.1	19.5	15.1	Oui
11	150	121	16.1	18.3	15.1	Oui
12	151	121	16.2	20.5	13.7	Oui
13	149	119	16.2	20.7	15.3	Oui
14	152	122	16.1	19.7	15.0	Oui
15	152	121	16.2	20.4	15.2	Oui
16	151	122	16.1	18.4	15.2	Oui
17	152	125	16.1	20.1	15.0	Oui
18	152	121	16.1	20.0	15.0	Oui
19	151	120	16.1	20.5	14.9	Oui
20	149	122	14.8	17.5	11.9	Non
21	151	120	14.3	16.1	12.1	Non
22	151	119	15.5	17.4	13.8	Non
23	151	119	14.6	16.1	13.3	Non
24	151	119	16.0	18.5	14.2	Non
25	149	118	16.0	20.0	15.0	Oui
26	151	119	15.8	18.1	15.0	Oui
27	152	122	15.9	17.2	15.3	Oui
28	152	123	16.1	18.5	15.2	Oui
29	152	121	16.0	18.0	15.0	Oui

(suite à la page suivante)

Tableau A I.3: Suite.

Numéro du manchon (suite)	Buse de pulvérisation		Soufflerie			
	Pression moyenne de l'air (kPa)	Pression moyenne de l'eau (kPa)	Vitesse moyenne de l'air (m/s)	Vitesse maximale de l'air (m/s)	Vitesse minimale de l'air (m/s)	Vitesse asservie
30	152	121	16.0	17.8	15.1	Oui
31	152	121	16.1	20.0	14.8	Oui
32	152	122	16.1	20.1	15.0	Oui
33	153	121	16.0	18.5	15.2	Oui
34	152	121	16.1	19.9	15.3	Oui
35	Acquisition informatique non récupérée					Oui
36	151	120	16.0	18.3	15.0	Oui
37	152	121	16.1	20.0	15.0	Oui
38	151	120	16.0	19.7	15.0	Oui
Moyenne	151.4	121.0	15.9	18.9	14.5	
Écart-type	0.97	1.33	0.35	1.19	1.19	
Maximum	153	125	16.2	20.7	17.8	
Minimum	149	118	14.6	16.1	11.5	

Tableau A I.4: Valeurs des pressions et des vitesses mesurées pendant la formation des manchons utilisés dans les travaux préliminaires.

Numéro du Manchon	Buse de pulvérisation		Soufflerie			
	Pression moyenne de l'air (kPa)	Pression moyenne de l'eau (kPa)	Vitesse moyenne de l'air (m/s)	Vitesse maximum de l'air (m/s)	Vitesse minimum de l'air (m/s)	Vitesse asservie
A	Acquisition informatique non récupérée					Non
B	146	119	14.6	16.0	7.0	Non
C	152	122	13.7	15.8	8.5	Non
D	152	122	14.6	16.0	11.5	Non
E	151	119	15.9	18.9	14.2	Oui

**Tableau A I.5:** Relevé des mesures de la teneur en eau de l'air dans la soufflerie.

Pression de l'air:	152 kPa		Vitesse de l'air, v:	16±0.5 m/s
Pression de l'eau:	124 kPa		Température:	-14 degré C
Débit d'eau:	48 ml/min		Distance de la buse:	2160 mm
Vitesse de la pompe:	170 RPM		Temps d'exposition, t:	60 sec
Rayon cylindre, Rc:	3.15 mm		Coef. de captation, $\eta$ :	0.9
Vol. spécifique, Vs:	1.25E-6 m <sup>3</sup> /g		Type de buse:	11-1/4J

No des tiges	Longueur du cylindre, L (mm)	Masse du cylindre (g)	Masse du cylindre glacé (g)	Masse de la glace, m (g)	Teneur en eau, W (g/m <sup>3</sup> )
1	38.49	42.386	42.735	0.349	1.54
2	38.75	42.289	42.579	0.290	1.28
3	38.53	42.273	42.582	0.309	1.37
4	38.57	42.202	42.484	0.282	1.26
5	38.29	41.983	42.266	0.283	1.27
6	38.53	42.104	42.367	0.263	1.18
7	38.65	42.185	42.499	0.314	1.39
8	37.99	42.218	42.481	0.263	1.19

Valeur moyenne	1.31
Écart-type	0.12

**Tableau A I.6:** Valeurs de la teneur en eau obtenues en fonction de l'alimentation de la buse de pulvérisation.

Numéro du relevé	Alimentation de la buse		Teneur en eau de l'air, W			
	Pression de l'air (kPa)	Débit d'eau (ml/min)	Moyenne (g/m <sup>3</sup> )	Écart-type (g/m <sup>3</sup> )	Valeur maximum (g/m <sup>3</sup> )	Valeur minimum (g/m <sup>3</sup> )
1	172	67	1.27	0.06	1.34	1.17
2	172	64	1.63	0.12	1.83	1.44
3	172	64	1.73	0.18	1.98	1.49
4	172	64	1.54	0.14	1.74	1.37
5	159	60	1.71	0.17	1.93	1.44
6	172	55	1.37	0.19	1.61	1.11
7	172	50	1.27	0.08	1.39	1.18
8	172	48	1.09	0.06	1.17	1.00
9	172	50	1.10	0.09	1.21	0.96
10	172	50	1.06	0.08	1.16	0.96
11	172	52	1.61	0.12	1.74	1.45
12	172	51	1.16	0.12	1.36	1.02
13	172	51	1.37	0.13	1.64	1.21
14	172	51	1.19	0.07	1.27	1.09
15	172	51	0.98	0.12	1.13	0.78
16	172	51	1.21	0.07	1.31	1.12
17	152	51	1.46	0.16	1.59	1.22
18	152	51	1.37	0.10	1.56	1.23
19	152	49	1.22	0.08	1.36	1.10
20	152	51	1.56	0.14	1.77	1.42
21	152	49	1.35	0.12	1.58	1.13
22	152	48	1.38	0.11	1.53	1.21
23	152	48	1.31	0.11	1.51	1.19
24	152	48	1.10	0.11	1.26	0.89
25	152	48	1.31	0.12	1.54	1.18

**Tableau A I.7:** Relevé de la distribution des diamètres des gouttelettes  
(Graphique à la figure A II.22).

Nombre de lamelles: 3		Pression d'eau: 124 kPa
Nombre de gouttes, N: 1847		Température: 2 degré C
Numéro des lamelles: F3, G2, G3		Vitesse de l'air: 16±0.5 m/s
Erreur stat., $\sqrt{N}/N$ : 2.3		Distance de la buse: 2160 mm
Pression d'air: 152 kPa		Type de buse: 11-¼J
Débit d'eau: 48 ml/min		

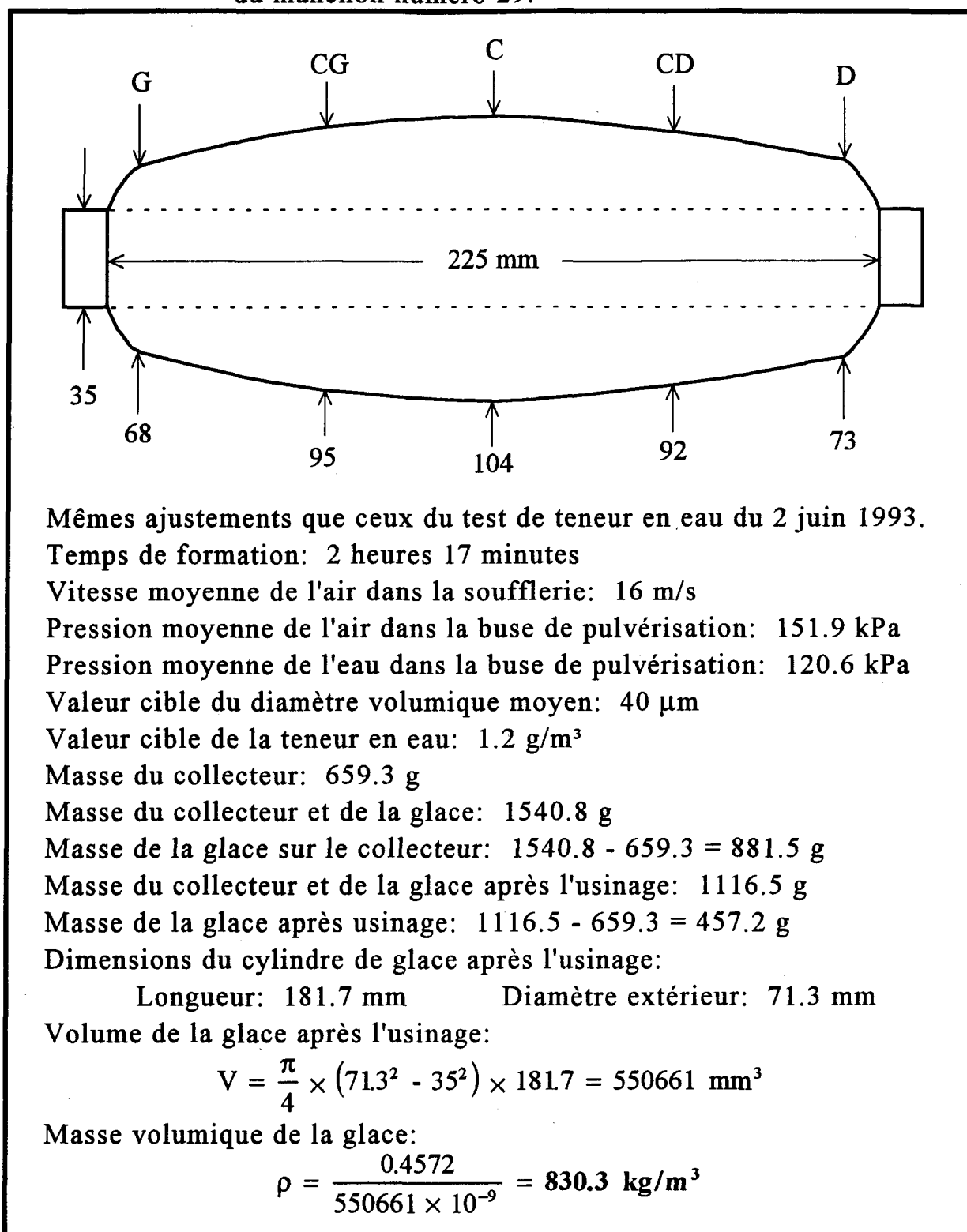
Diamètre des gouttes (µm)	Nombre de gouttes N	% de N total %N	% de N cumulé	Volume (µm³)	% du volume total	% du volume cumulé
2	34	2	1.84	153	0.0	0.00
7	250	14	15.38	41706	0.3	0.31
11	536	29	44.40	366458	2.7	3.04
15	385	21	65.24	684441	5.1	8.13
19	241	13	78.29	883406	6.6	14.71
23	143	8	86.03	938604	7.0	21.70
27	77	4	90.20	823016	6.1	27.82
31	45	2	92.64	731550	5.4	33.27
36	36	2	94.59	845448	6.3	39.56
40	39	2	96.70	1270970	9.5	49.02
44	18	1	97.67	788151	5.9	54.89
48	10	1	98.21	572928	4.3	59.15
52	7	0	98.59	513277	3.8	62.97
56	6	0	98.92	552601	4.1	67.09
60	7	0	99.30	796838	5.9	73.02
64	4	0	99.51	554974	4.1	77.15
68	4	0	99.73	668179	5.0	82.12
72	1	0	99.78	198955	1.5	83.60
77	0	0	99.78	0	0.0	83.60
81	0	0	99.78	0	0.0	83.60
89	1	0	99.84	366638	2.7	86.33
101	1	0	99.89	541550	4.0	90.37
105	1	0	99.95	610123	4.5	94.91
109	1	0	100	684253	5.1	100
TOTAL	1847	100		13434220	100	

**Tableau A I.8:** Résultats des relevés du diamètre volumique médian des gouttelettes (Graphique à la figure A II.23).

Numéro du relevé	Nombre de gouttes N	Pression d'air (kpa)	Débit d'eau (ml/min)	Diamètre volumique ( $\mu\text{m}$ )	Écart statistique ( $\mu\text{m}$ )
1	1126	124	48	30.3	$\pm 0.9$
2	1834	124	48	48.2	$\pm 1.1$
3	1847	152	48	40.3	$\pm 0.9$
4	2050	152	48	57.6	$\pm 1.3$
5	1813	152	48	35.0	$\pm 0.8$
6	2914	152	51	23.7	$\pm 0.4$
7	1806	152	51	51.8	$\pm 1.2$
8	2031	172	51	31.0	$\pm 0.7$
9	1790	172	64	35.7	$\pm 0.8$
10	2801	179	48	31.5	$\pm 0.6$
11	1952	179	48	28.9	$\pm 0.7$



**Tableau A I.9:** Fiche descriptive des paramètres et des caractéristiques du manchon numéro 29.



**Tableau A I.10: Caractéristiques de formation des manchons et valeur de la masse volumique de la glace.**

Numéro du manchon	Date de formation	Durée de formation, $t_f$ (min)	Masse de la glace, $m_g$ (g)	Taux d'accumulation, $I_a$ (g/min)	Coef-ficient de captation, $\eta$	Masse volumique, $\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )
A	92/11/10	109	-----	-----	-----	866.7
B	93/01/21	77	469.1	6.09	0.45	834.5
C	93/06/02	115	-----	-----	-----	801.5 *
D	93/06/09	110	656.6	5.97	0.41	840.4 *
E	93/06/17	115	879.7	7.65	0.48	857.0 *
1	93/06/29	114	723.4	6.35	0.42	872.4 *
2	93/07/12	122	789.2	6.47	0.42	855.8 *
3	93/07/14	125	917.6	7.34	0.45	845.9
4	93/07/21	114	799.7	7.01	0.45	840.6
5	93/07/27	123	617.5	5.02	0.35	867.3
6	93/08/03	125	842.5	6.74	0.43	847.6
7	93/08/10	125	760.5	6.08	0.40	841.8
8	93/08/31	121	762.3	6.30	0.41	837.7
9	93/09/07	134	891.4	6.65	0.41	843.6
10	93/09/14	140	962.2	6.87	0.42	835.9
11	93/09/20	131	833.2	6.36	0.40	866.7
12	93/09/22	140	960.2	6.86	0.42	850.2
13	93/10/14	142	943.6	6.65	0.41	850.0
14	93/10/18	138	951.2	6.89	0.42	852.1
15	93/10/25	152	1050.0	6.91	0.41	841.0
16	93/10/28	185	1375.4	7.43	0.40	824.8
17	93/11/08	178	1220.7	6.86	0.39	836.0
18	93/11/17	184	1301.2	7.07	0.39	832.8
19	93/11/23	190	1321.3	6.95	0.38	831.4
20	94/01/11	164	1168.5	7.13	0.41	827.6
21	94/01/24	155	916.8	5.91	0.37	816.5
22	94/01/26	135	869.9	6.44	0.40	843.5
23	94/01/28	134	822.4	6.14	0.39	843.1
24	94/02/14	148	867.1	5.86	0.37	845.9
25	94/02/24	141	886.6	6.29	0.39	847.5
26	94/03/10	154	1077.6	7.00	0.41	841.7

(suite à la page suivante)

Tableau A I.10: Suite.

Numéro du manchon	Date de formation	Durée de formation, $t_f$ (min)	Masse de de la glace, $m_g$ (g)	Taux d'accu- mulation, $I_a$ (g/min)	Coef- ficient de captation, $\eta$	Masse volumique, $\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )
27	94/03/17	133	876.0	6.59	0.41	840.3
28	94/03/21	121	761.6	6.29	0.41	840.8
29	94/03/24	137	881.5	6.43	0.40	830.3
30	94/03/28	133	956.6	7.19	0.44	838.4
31	94/04/05	136	916.1	6.74	0.42	847.1
32	94/04/12	157	1016.5	6.47	0.39	830.7
33	94/04/13	132	815.8	6.18	0.40	841.4
34	94/04/19	133	900.1	6.77	0.42	818.1
35	94/05/03	135	829.2	6.14	0.39	831.7
36	94/05/05	131	877.0	6.69	0.42	836.2
37	94/05/09	126	818.6	6.50	0.42	847.7
38	94/05/12	143	977.2	6.83	0.41	840.6 *

\*: Indique que des mesures de la masse volumique ont aussi été effectuées par la méthode de la poussée d'Archimède sur des échantillons de glace taillés à partir de ces mêmes manchons. Ces valeurs sont données au tableau A I.12.

La figure A II.26 donne la représentation graphique des valeurs de la masse volumique.

**Tableau A I.11: Procédé de mesure de la masse volumique de la glace par le principe d'Archimède.**

Manchon de glace numéro D			
Numéro de l'échantillon	1	2	3
$M_g$ (g)	16.24	13.54	15.32
$G_f$ (g)	17.51	14.63	16.44
$H_c$ (g)	115.11	114.42	113.55
PA (g)	131.54	128.09	128.87
$M_f = G_f - M_g$ (g)	1.27	1.09	1.12
$V_f = M_f / \rho_f$ (cm <sup>3</sup> )	1.0128	0.8692	0.8931
$M_h = PA - H_c$ (g)	16.43	13.67	15.32
$V_h = M_h / \rho_h$ (cm <sup>3</sup> )	19.843	16.5097	18.5024
$V_g = V_h - V_f$ (cm <sup>3</sup> )	18.8302	15.6404	17.6093
$M_v = M_g / V_g$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.8624	0.8657	0.8700
<p> <math>M_g</math> = Masse de l'échantillon  <math>G_f</math> = Masse de l'échantillon enrobé de formvar  <math>H_c</math> = Masse de l'huile et du contenant  PA = Poussée d'Archimède  <math>M_f</math> = Masse de la pellicule de formvar  <math>V_f</math> = Volume de la pellicule de formvar  <math>M_h</math> = Masse de l'huile déplacée  <math>V_h</math> = Volume de l'huile déplacée  <math>V_g</math> = Volume de l'échantillon de glace  <math>M_v</math> = Masse volumique de l'échantillon de glace  <math>\rho_h</math> = Densité de l'huile à -10°C, (0.828 g/cm<sup>3</sup>)  <math>\rho_f</math> = Densité du formvar à -10°C, (1.254 g/cm<sup>3</sup>) </p>			

**Tableau A I.12:** Valeurs des masses volumiques obtenues en utilisant le principe d'Archimède.

Numéro du manchon	Masse du morceau de glace $M_g$ (g)	Masse volumique, (principe d'Archimède) $\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )	Moyenne des masses volumiques $\rho_g$ (kg/m <sup>3</sup> )
C	8.25	886	867
C	6.96	862	
C	5.63	854	
D	16.24	862	866
D	13.14	866	
D	15.32	870	
E	27.65	860	852
E	22.32	863	
E	24.97	834	
1	18.40	870	867
1	18.48	866	
1	18.44	866	
2	21.09	866	867
2	22.79	868	
2	24.03	867	
43	26.37	865	857
43	26.30	860	
43	23.73	847	

La figure A II.26 donne la représentation graphique des valeurs de la masse volumique.

**Tableau A I.13: Paramètres utilisés et contraintes maximales obtenues pour chacun des essais de cisaillement.**

Essai		Éprouvette		Jeu poinçon-matrice (mm)	Vitesse de la traverse (mm/min)	Taux de déformation (s <sup>-1</sup> )	Contrainte maximale et confinement	
No	Date	No	Épaisseur (mm)				Total (MPa)	Partiel (MPa)
1	05-Jul-93	1	12.0	0.75	0.45	2.00E-2	1.800	
2	"	2	12.0	0.75	0.12	5.33E-3	1.413	
3	"	3	12.0	0.75	0.12	5.33E-3	1.282	
4	13-Jul-93	1	12.0	0.75	0.12	5.33E-3	1.464	
5	"	2	12.0	0.75	0.24	1.07E-2	1.489	
6	"	3	12.0	0.75	0.24	1.07E-2	1.662	
7	16-Jul-93	1	12.0	0.75	0.24	1.07E-2		1.317
8	19-Jul-93	2	12.0	0.75	0.24	1.07E-2	1.781	
9	"	3	12.0	0.75	0.24	1.07E-2		1.312
10	"	4	12.0	0.75	0.24	1.07E-2	1.5	
11	"	5	12.0	0.75	0.5	2.22E-2	1.747	
12	22-Jul-93	1	12.0	0.75	0.5	2.22E-2	1.807	
13	"	2	12.0	0.75	0.5	2.22E-2	1.716	
14	"	3	12.0	0.75	1	4.44E-2	1.943	
15	"	4	12.0	0.75	1	4.44E-2	1.743	
16	23-Jul-93	5	11.9	0.75	1	4.44E-2	1.905	
17	"	6	11.9	0.75	0.022	9.78E-4	1.026	
18	28-Jul-93	1	12.0	0.75	0.5	2.22E-2	0.907	*
19	"	2	12.1	0.75	0.5	2.22E-2	0.884	*
20	"	3	10.1	0.75	0.5	2.22E-2	2.073	
21	"	4	10.1	0.75	0.5	2.22E-2	1.918	
22	"	5	11.9	0.75	0.022	9.78E-4	1.032	
23	29-Jul-93	6	11.9	0.75	0.022	9.78E-4	1.128	
24	04-Août-93	1	10.2	0.75	1	4.44E-2	2.173	
25	"	2	10.2	0.75	1	4.44E-2	1.932	
26	"	3	10.1	0.75	1	4.44E-2	1.852	
27	"	4	10.2	0.75	5.3	2.36E-1	2.566	
28	"	5	10.0	0.75	5.3	2.36E-1	2.603	
29	"	6	10.1	0.75	5.3	2.36E-1	2.719	
30	11-Août-93	1	12.1	0.75	5.3	2.36E-1	2.855	
31	"	2	11.8	0.75	5.3	2.36E-1	2.564	
32	12-Août-93	3	12.1	0.75	5.3	2.36E-1	2.328	

(suite à la page suivante)

Tableau A I.13: Suite.

Essai		Éprouvette		Jeu poinçon-matrice (mm)	Vitesse de la traverse (mm/min)	Taux de déformation (s <sup>-1</sup> )	Contrainte maximale et confinement	
No	Date	No	Épaisseur (mm)				Total (MPa)	Partiel (MPa)
33	"	4	12.5	0.75	5.3	2.36E-1	2.673	
34	13-Août-93	5	12.2	0.75	5.3	2.36E-1	2.435	
35	01-Sep-93	1	12.0	0.75	12.3	5.47E-1	2.851	
36	"	2	12.0	0.75	12.3	5.47E-1	2.971	
37	"	3	11.6	0.75	12.3	5.47E-1	3.612	
38	"	4	10.2	0.75	12.3	5.47E-1	3.222	
39	"	5	10.5	0.75	12.3	5.47E-1	2.847	
40	"	6	10.5	0.75	12.3	5.47E-1	3.663	
41	08-Sep-93	1	12.0	0.75	35	1.56E+0	4.348	
42	"	2	12.0	0.75	35	1.56E+0	3.929	
43	"	3	12.0	0.75	35	1.56E+0	4.072	
44	"	4	10.2	0.75	35	1.56E+0	4.789	
45	"	5	10.1	0.75	35	1.56E+0	4.381	
46	"	6	10.2	0.75	35	1.56E+0	4.072	
47	16-Sep-93	1	12.1	0.75	67.7	3.01E+0	4.945	
48	"	2	12.2	0.75	67.7	3.01E+0	5.076	
49	"	3	10.2	0.75	67.7	3.01E+0	5.248	
50	"	4	10.1	0.75	67.7	3.01E+0	4.944	
51	"	5	8.0	0.75	67.7	3.01E+0	4.988	
52	"	6	8.1	0.75	67.7	3.01E+0	4.198	
53	21-Sep-93	1	12.0	0.75	67.7	3.01E+0	0.785	*
54	"	2	12.0	0.75	317	1.41E+1	3.551	*
55	"	3	12.0	0.75	317	1.41E+1	6.114	**
56	"	4	10.2	0.75	317	1.41E+1	7.619	**
57	"	5	8.1	0.75	317	1.41E+1	7.392	**
58	"	6	8.2	0.75	317	1.41E+1	6.871	**
59	23-Sep-93	1	12.1	0.75	67.7	3.01E+0	5.273	
60	"	2	9.9	0.75	317	1.41E+1	5.804	**
61	"	3	10.2	0.75	317	1.41E+1	6.210	**
62	24-Sep-93	4	8.1	0.75	317	1.41E+1	5.560	**
63	"	5	8.2	0.75	67.7	3.01E+0	5.980	
64	"	6	8.1	0.75	35	1.56E+0	4.947	
65	15-Oct-93	1	8.1	0.75	35	1.56E+0	4.700	

(suite à la page suivante)

Tableau A I.13: Suite.

Essai		Éprouvette		Jeu poinçon-matrice (mm)	Vitesse de la traverse (mm/min)	Taux de déformation (s <sup>-1</sup> )	Contrainte maximale et confinement	
No	Date	No	Épaisseur (mm)				Total (MPa)	Partiel (MPa)
66	"	2	8.1	0.75	35	1.56E+0	4.700	
67	"	3	8.1	0.75	12.3	5.47E-1	3.540	
68	"	4	8.1	0.75	12.3	5.47E-1	3.447	
69	"	5	8.0	0.75	12.3	5.47E-1	3.837	
70	"	6	8.0	0.75	12.3	5.47E-1	3.507	
71	19-Oct-93	1	8.0	0.75	5.3	2.36E-1	3.044	
72	"	2	8.1	0.75	5.3	2.36E-1	3.067	
73	"	3	8.0	0.75	5.3	2.36E-1	3.498	
74	"	4	8.0	0.75	1	4.44E-2	2.182	
75	"	5	8.0	0.75	1	4.44E-2	2.203	
76	"	6	8.0	0.75	1	4.44E-2	2.142	
77	26-Oct-93	1	10.0	0.75	67.7	3.01E+0	4.971	
78	"	2	10.0	0.75	0.5	2.22E-2	1.908	
79	"	3	8.0	0.75	0.5	2.22E-2	2.183	
80	"	4	8.0	0.75	0.5	2.22E-2	2.140	
81	"	5	8.0	0.75	0.5	2.22E-2	2.239	
82	"	6	10.0	0.75	2.3	1.02E-1	2.573	
83	01-Nov-93	1	10.1	0.75	0.24	1.07E-2	1.699	
84	"	2	10.0	0.75	0.24	1.07E-2	1.847	
85	02-Nov-93	3	10.1	0.75	0.24	1.07E-2	1.785	
86	"	4	8.0	0.75	0.24	1.07E-2	1.885	
87	"	5	8.1	0.75	0.24	1.07E-2	1.935	
88	09-Nov-93	1	10.1	0.75	2.3	1.02E-1	2.737	
89	"	2	10.0	0.75	2.3	1.02E-1	2.676	
90	"	3	8.1	0.75	2.3	1.02E-1	3.090	
91	"	4	8.1	0.75	2.3	1.02E-1	2.946	
92	"	5	8.0	0.75	2.3	1.02E-1	3.005	
93	18-Nov-93	1	9.9	0.75	0.12	5.33E-3	1.988	
94	"	2	10.0	0.75	0.12	5.33E-3	1.866	
95	"	3	10.0	0.75	0.022	9.78E-4	1.425	
96	19-Nov-93	4	8.1	0.75	0.12	5.33E-3	1.758	
97	"	5	8.1	0.75	0.12	5.33E-3	1.841	
98	"	6	8	0.75	0.022	9.78E-4	1.321	

(suite à la page suivante)



Tableau A I.13: Suite.

Essai		Éprouvette		Jeu poinçon- matrice (mm)	Vitesse de la traverse (mm/min)	Taux de défor- mation (s <sup>-1</sup> )	Contrainte maximale et confinement	
No	Date	No	Épais- seur (mm)				Total (MPa)	Partiel (MPa)
99	24-Nov-93	1	8.1	0.75	0.005	2.22E-4	0.947	
100	26-Nov-93	2	12.1	0.75	0.005	2.22E-4	0.945	
101	28-Nov-93	3	12.1	0.75	0.005	2.22E-4	1.052	
102	01-Déc-93	4	8.1	0.75	0.005	2.22E-4	1.036	
103	03-Déc-93	5	10.0	0.75	0.005	2.22E-4	1.019	
104	12-Jan-94	1	12.1	0.75	0.002	8.89E-5	0.851	
105	16-Jan-94	2	10.1	0.75	0.002	8.89E-5	0.980	
106	21-Jan-94	3	12.1	0.75	317	1.41E+1		0.326 **
107	"	4	10.1	0.75	12.3	5.47E-1		0.936
108	"	5	8.0	0.75	12.3	5.47E-1		1.074
109	"	6	8.2	0.75	12.3	5.47E-1		0.911
110	25-Jan-94	1	10.0	0.75	317	1.41E+1		0.358 **
111	"	2	10.3	0.75	317	1.41E+1		0.313 **
112	26-Jan-94	3	10.3	0.75	317	1.41E+1		0.273
113	"	4	10.0	0.75	317	1.41E+1		0.332
114	"	5	10.1	0.75	317	1.41E+1		0.262
115	27-Jan-94	1	10.2	0.75	35	1.56E+0		0.895
116	"	2	10.2	0.75	35	1.56E+0		0.99
117	"	3	10.2	0.75	35	1.56E+0		0.886
118	"	4	10.0	0.75	2.3	1.02E-1		1.453
119	"	5	10.1	0.75	2.3	1.02E-1		1.445
120	"	6	10.2	0.75	2.3	1.02E-1		1.384
121	31-Jan-94	1	10.2	0.75	0.24	1.07E-2		1.278
122	"	2	10.1	0.75	0.24	1.07E-2		1.388
123	"	3	10.1	0.75	0.24	1.07E-2		1.345
124	"	4	10.2	0.75	0.022	9.78E-4		1.137
125	01-Fév-94	5	10.2	0.75	0.022	9.78E-4		1.136
126	02-Fév-94	6	10.1	0.75	0.022	9.78E-4		1.081
127	15-Fév-94	1	10.2	0.43	317	2.46E+1	7.410	
128	"	2	10.1	0.43	317	2.46E+1	7.588	
129	"	3	10.0	0.43	317	2.46E+1	7.812	
130	"	4	10.0	0.43	35	2.71E+0	4.940	
131	"	5	10.1	0.43	35	2.71E+0	5.572	

(suite à la page suivante)

Tableau A I.13: Suite.

Essai		Éprouvette		Jeu poinçon- matrice (mm)	Vitesse de la traverse (mm/min)	Taux de défor- mation (s <sup>-1</sup> )	Contrainte maximale et confinement	
No	Date	No	Épais- seur (mm)				Total (MPa)	Partiel (MPa)
132	"	6	10.3	0.43	35	2.71E+0	5.596	
133	24-Fév-94	1	10.0	0.43	2.3	1.78E-1	2.851	
134	"	2	9.9	0.43	2.3	1.78E-1	3.174	
135	25-Fév-94	3	10.1	0.43	2.3	1.78E-1	3.070	
136	"	4	10.1	0.43	0.24	1.86E-2	1.976	
137	"	5	10.1	0.43	0.24	1.86E-2	1.997	
138	14-Mar-94	1	10.1	0.43	400	3.10E+1	6.430	
139	"	2	10.0	0.43	400	3.10E+1	7.346	
140	"	3	10.1	0.43	400	3.10E+1	7.588	
141	15-Mar-94	4	10.2	0.75	400	1.78E+1	8.345	
142	"	5	10.1	0.75	400	1.78E+1	8.565	
143	"	6	10.1	0.75	400	1.78E+1	5.670	
144	18-Mar-94	1	10.2	0.75	400	1.78E+1		0.572
145	"	2	10.1	0.75	400	1.78E+1		0.287
146	"	3	10.1	0.75	400	1.78E+1		0.286
147	"	4	10.0	0.43	0.022	1.71E-3	1.574	
148	19-Mar-94	5	10.1	0.43	0.022	1.71E-3	1.721	
149	20-Mar-94	6	10.1	0.43	0.022	1.71E-3	1.866	
150	22-Mar-94	1	10.1	2.19	317	4.82E+0	5.264	
151	"	2	10.1	2.19	317	4.82E+0	4.399	
152	"	3	10.1	2.19	317	4.82E+0	5.857	
153	"	4	9.8	2.19	67.7	1.03E+0	3.489	
154	"	5	9.9	2.19	67.7	1.03E+0	5.257	
155	"	6	10.0	2.19	67.7	1.03E+0	4.903	
156	25-Mar-94	1	10.1	2.19	12.3	1.87E-1	3.882	
157	"	2	9.9	2.19	12.3	1.87E-1	3.928	
158	"	3	10.1	2.19	12.3	1.87E-1	3.956	
159	"	4	10.1	2.19	2.3	3.50E-2	2.300	
160	"	5	10.3	2.19	2.3	3.50E-2	2.768	
161	"	6	10.2	2.19	2.3	3.50E-2	2.685	
162	28-Mar-94	1	10.2	2.19	0.24	3.65E-3	1.688	
163	"	2	10.1	2.19	0.24	3.65E-3	1.742	
164	"	3	10	2.19	0.24	3.65E-3	1.843	

(suite à la page suivante)

Tableau A I.13: Suite.

Essai		Éprouvette		Jeu poinçon-matrice (mm)	Vitesse de la traverse (mm/min)	Taux de déformation (s <sup>-1</sup> )	Contrainte maximale et confinement	
No	Date	No	Épaisseur (mm)				Total (MPa)	Partiel (MPa)
165	"	4	10.2	2.19	0.022	3.35E-4	1.266	
166	29-Mar-94	5	10.2	2.19	0.022	3.35E-4	1.307	
167	31-Mar-94	6	10.3	2.19	0.022	3.35E-4	1.270	
168	06-Avr-94	1	10.3	2.19	400	6.09E+0		0.499
169	"	2	10.2	2.19	400	6.09E+0		0.367
170	"	3	10.0	2.19	400	6.09E+0		0.363
171	"	4	10.0	2.19	0.022	3.35E-4		1.207
172	"	5	10.1	2.19	0.022	3.35E-4		1.193
173	07-Avr-94	6	10.0	2.19	0.022	3.35E-4		1.102
174	13-Avr-94	1	10.2	2.19	35	5.33E-1		0.782
175	"	2	10.1	2.19	35	5.33E-1		1.135
176	"	3	10.3	2.19	35	5.33E-1		0.815
177	"	4	10.3	2.19	2.3	3.50E-2		1.203
178	"	5	10.2	2.19	2.3	3.50E-2		0.730
179	"	6	10.2	2.19	2.3	3.50E-2		0.928
180	14-Avr-94	1	10.1	2.19	0.24	3.65E-3		0.988
181	"	2	10.0	2.19	0.24	3.65E-3		1.303
182	"	3	10.1	2.19	0.24	3.65E-3		1.273
183	15-Avr-94	4	12.0	0.75	400	1.78E+1	6.179	
184	"	5	12.1	0.75	400	1.78E+1	8.216	
185	"	6	12.1	0.75	400	1.78E+1	7.972	
186	20-Avr-94	1	10.1	0.43	0.022	1.71E-3	0.414 *	
187	"	2	10.0	0.43	0.022	1.71E-3		1.270
188	21-Avr-94	3	10.0	0.43	0.022	1.71E-3		1.340
189	22-Avr-94	4	10.0	0.43	400	3.10E+1		0.713
190	"	5	10.1	0.43	400	3.10E+1		0.768
191	"	6	10.2	0.43	0.022	1.71E-3		1.346
192	04-Mai-94	1	10.0	0.43	0.24	1.86E-2		1.367
193	"	2	10.2	0.43	0.24	1.86E-2		1.293
194	"	3	10.2	0.43	0.24	1.86E-2		1.426
195	"	4	10.0	0.43	2.3	1.78E-1		1.323
196	"	5	10.0	0.43	2.3	1.78E-1		1.747
197	"	6	10.1	0.43	2.3	1.78E-1		1.640

(suite à la page suivante)

Tableau A I.13: Suite.

Essai		Éprouvette		Jeu poinçon-matrice (mm)	Vitesse de la traverse (mm/min)	Taux de déformation (s <sup>-1</sup> )	Contrainte maximale et confinement	
No	Date	No	Épaisseur (mm)				Total (MPa)	Partiel (MPa)
198	06-Mai-94	1	10.0	0.43	35	2.71E+0		0.766
199	"	2	10.0	0.43	35	2.71E+0		1.027
200	"	3	10.2	0.43	35	2.71E+0		1.224
201	"	4	10.1	0.43	35	2.71E+0		0.818
202	"	5	10.1	0.43	400	3.10E+1		0.377
203	"	6	10.2	0.43	2.3	1.78E-1		1.379
204	10-Mai-94	1	10.1	0.43	400	3.10E+1		0.371
205	"	2	9.7	0.43	2.3	1.78E-1		1.390
206	11-Mai-94	3	9.9	0.43	0.5	3.88E-2		1.463
207	"	4	9.8	0.43	0.5	3.88E-2		1.524
208	12-Mai-94	5	10.2	0.43	400	3.10E+1		0.375
209	"	6	10.0	0.43	0.5	3.88E-2		1.351
210	13-Mai-94	1	10.0	0.43	0.24	1.86E-2	2.027	
211	"	2	8.1	0.43	12.3	9.53E-1	4.727	
212	"	3	12.1	0.43	12.3	9.53E-1	4.353	
213	"	4	12.1	0.43	12.3	9.53E-1	4.615	

\*: Indique des essais dans lesquels toutes les manipulations ainsi que tous les paramètres préétablis n'ont pas été satisfaits.

\*\*: Indique des essais dans lesquels l'acquisition de données par informatique est manquante. Pour chacun de ces essais, la valeur de la charge maximale à la rupture a été relevée sur le panneau de commande de la presse. Sur ce dernier, la valeur indiquée est inférieure de 11.7% en moyenne pour des essais rapides. Pour palier cette lacune, les valeurs maximales ont été majorées de ce pourcentage.

Les figures A II.37 à A II.44 donnent les représentations graphiques des valeurs des contraintes maximales.

**Tableau A I.14: Caractéristiques de la montée en charge et module de Coulomb pour quelques essais de cisaillement.**

No de l'essai	Jeu poinçon-matrice (mm)	Taux de déformation (s <sup>-1</sup> )	Régression			Montée en charge		
			Pente de la droite, $\times 10^{-6}$ (N/m)	Degrés de liberté, n-m	Coef-ficient, $r^2$ (%)	Facteur de forme	Course du poinçon (mm)	Module de Coulomb (MPa)
17	0.75	9.78E-4	3.44	32	99	1.8	1.02	0.68 *
22	0.75	9.78E-4	5.76	23	100	2.5	0.87	1.13 *
23	0.75	9.78E-4	5.23	30	100	2.5	1.04	1.03 *
44	0.75	1.56E+0	6.19	6	95	1.3	1.58	1.42 *
45	0.75	1.56E+0	7.35	4	99	1.8	1.74	1.71 *
46	0.75	1.56E+0	8.28	2	99	1.8	1.44	1.90 *
82	0.75	1.02E-1	11.81	20	97	2.2	0.76	2.77 *
84	0.75	1.07E-2	10.13	29	99	2.4	0.71	2.38 *
88	0.75	1.02E-1	10.46	38	99	2.4	1.00	2.43 *
89	0.75	1.02E-1	7.89	50	98	2.0	1.10	1.85 *
95	0.75	9.78E-4	7.14	22	99	2.4	0.77	1.67 *
101	0.75	2.22E-4	6.88	16	99	2.6	0.77	1.33 *
112	0.75	1.41E+1	1.34	29	93	1.0	0.33	0.31
113	0.75	1.41E+1	1.10	13	99	3.5	1.67	0.26
114	0.75	1.41E+1	1.13	20	98	8.1	3.02	0.26
115	0.75	1.56E+0	5.95	20	98	1.3	0.33	1.37
116	0.75	1.56E+0	6.20	14	98	1.7	0.43	1.43
117	0.75	1.56E+0	6.01	16	97	1.5	0.35	1.38
118	0.75	1.02E-1	7.85	19	99	1.7	0.50	1.84
119	0.75	1.02E-1	6.98	31	97	1.4	0.47	1.62
120	0.75	1.02E-1	7.64	28	98	1.3	0.37	1.77
122	0.75	1.07E-2	7.47	20	100	1.5	0.46	1.74
124	0.75	9.78E-4	6.21	26	100	2.2	0.66	1.43
125	0.75	9.78E-4	5.17	28	100	2.4	0.87	1.19
126	0.75	9.78E-4	5.69	25	99	2.1	0.65	1.31
133	0.43	1.78E-1	7.95	33	96	2.2	1.27	1.07 *
134	0.43	1.78E-1	10.37	23	100	1.8	0.89	1.41 *
135	0.43	1.78E-1	9.79	27	99	2.7	1.37	1.30 *
138	0.43	3.10E+1	11.23	56	99	1.2	1.10	1.49 *
139	0.43	3.10E+1	14.16	36	98	1.2	1.00	1.90 *
140	0.43	3.10E+1	12.72	39	98	1.2	1.10	1.69 *

(suite à la page suivante)

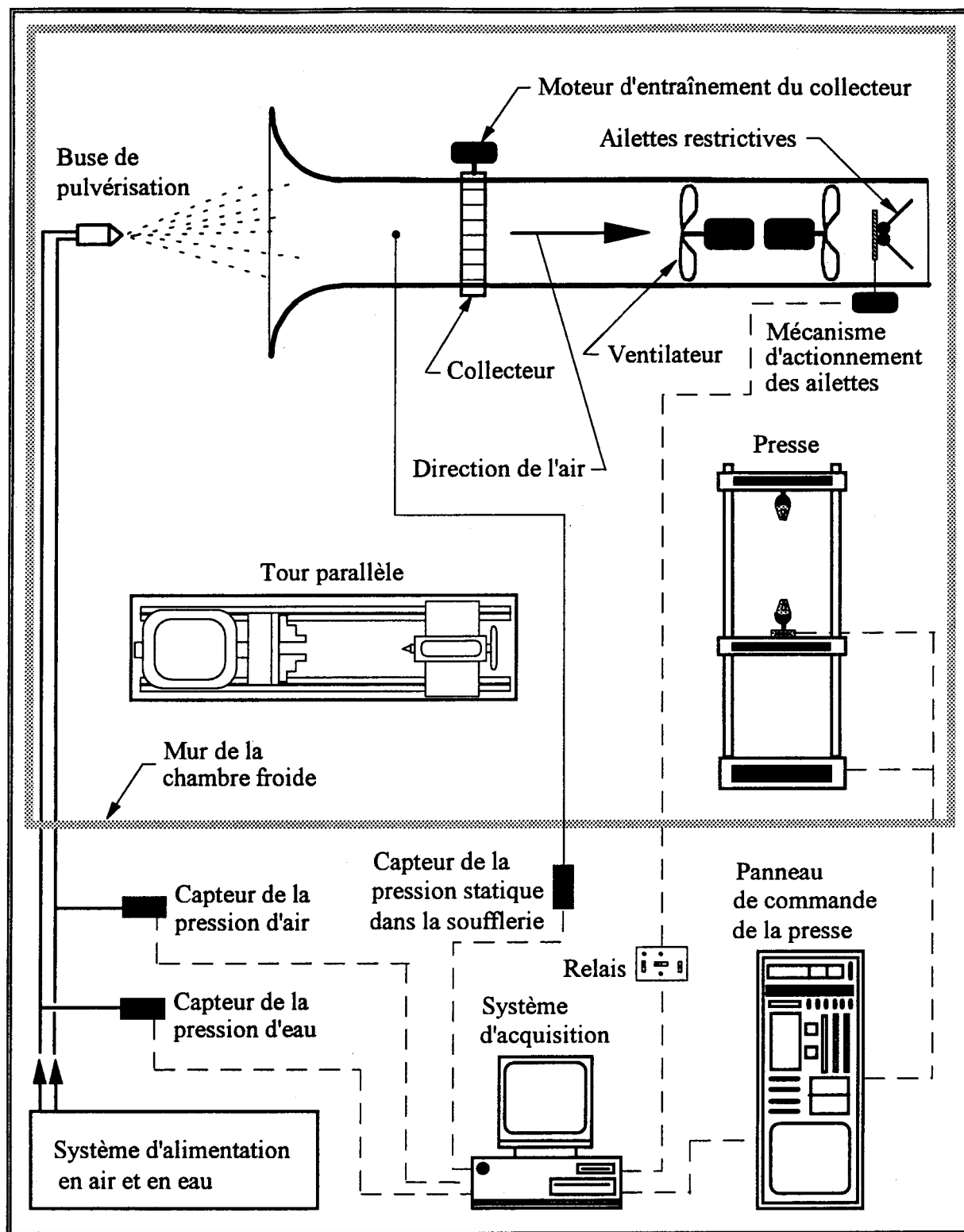
Tableau A I.14: Suite.

No de l'essai	Jeu poinçon-matrice (mm)	Taux de déformation (s <sup>-1</sup> )	Régression			Montée en charge		
			Pente de la droite, $\times 10^{-6}$ (N/m)	Degrés de liberté, n-m	Coef-ficient, r <sup>2</sup> (%)	Facteur de forme	Course du poinçon (mm)	Module de Coulomb (MPa)
141	0.75	1.78E+1	13.93	46	98	1.2	1.20	3.20 *
142	0.75	1.78E+1	13.23	54	99	1.2	1.26	3.07 *
143	0.75	1.78E+1	11.40	47	100	1.2	1.00	2.65 *
144	0.75	1.78E+1	5.25	11	98	1.9	0.34	1.21
145	0.75	1.78E+1	2.33	9	96	2.0	0.40	0.54
146	0.75	1.78E+1	1.86	10	97	1.6	0.40	0.43
150	2.19	4.82E+0	11.48	51	100	1.2	0.90	7.79 *
151	2.19	4.82E+0	10.90	45	100	1.4	0.89	7.39 *
152	2.19	4.82E+0	11.20	58	100	1.3	1.10	7.59 *
162	2.19	3.65E-3	7.77	23	100	2.4	0.85	5.22 *
163	2.19	3.65E-3	7.15	24	100	1.8	0.73	4.85 *
164	2.19	3.65E-3	7.63	21	99	1.8	0.71	5.22 *
168	2.19	6.09E+0	3.34	7	92	1.3	0.31	2.22
169	2.19	6.09E+0	2.56	9	96	1.4	0.33	1.72
170	2.19	6.09E+0	3.22	13	97	1.5	0.27	2.20
180	2.19	3.65E-3	5.78	20	99	1.7	0.48	3.92
181	2.19	3.65E-3	6.90	17	99	2.2	0.66	4.73
182	2.19	3.65E-3	5.53	19	98	1.8	0.65	3.75
202	0.43	3.10E+1	2.41	14	97	1.6	0.40	0.32
204	0.43	3.10E+1	3.68	10	97	1.5	0.20	0.49
206	0.43	3.88E-2	9.18	18	99	1.4	0.36	1.25
207	0.43	3.88E-2	9.45	13	99	1.6	0.40	1.30
208	0.43	3.10E+1	2.87	8	96	1.3	0.30	0.38
209	0.43	3.88E-2	7.75	24	91	1.9	0.57	1.04

\*: Indique des essais effectués en confinement total. Les autres, sans indice, sont effectués en confinement partiel.

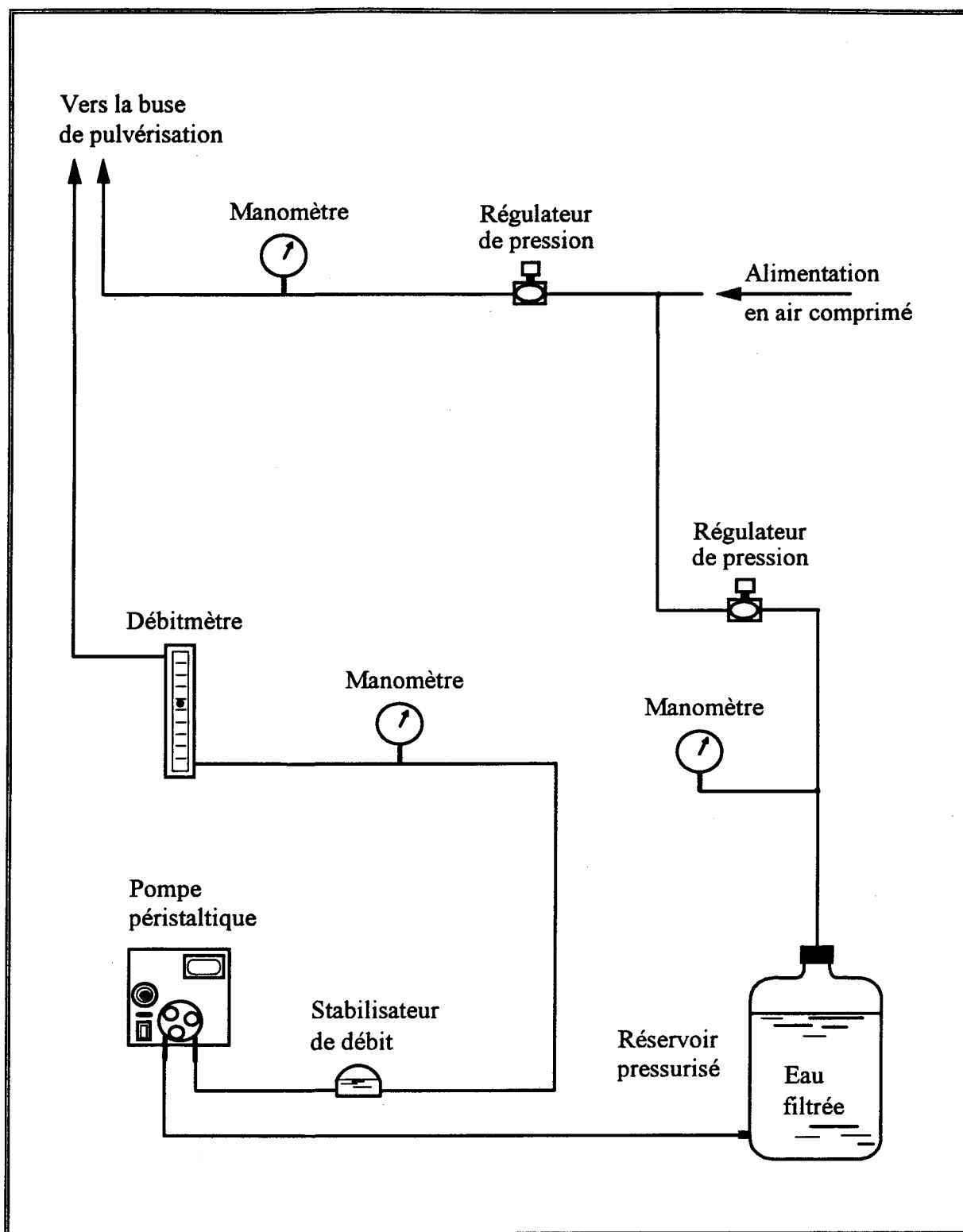
La figure A II.33 donne la représentation graphique des valeurs des modules de cisaillement.

## **ANNEXE II**

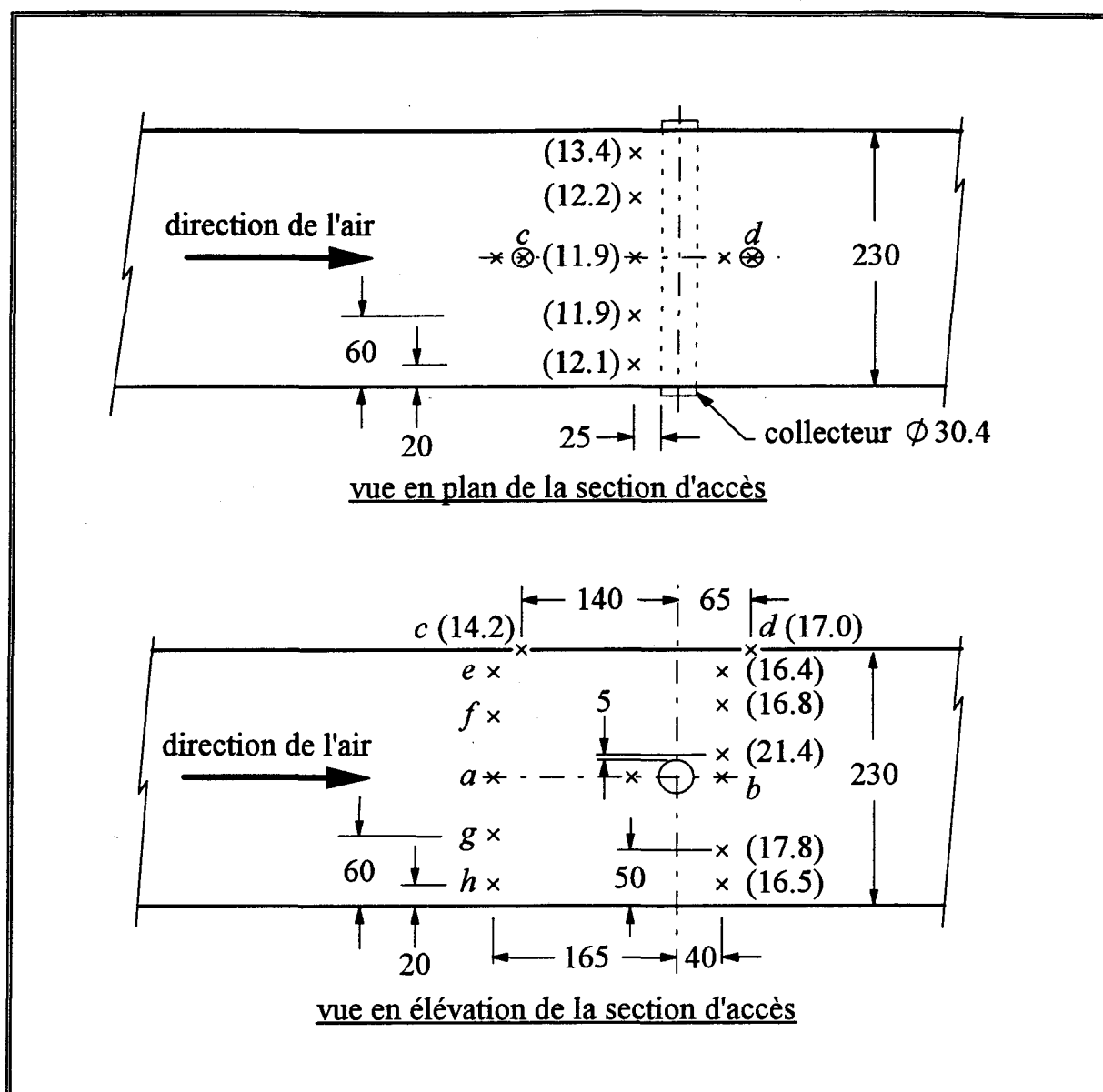


**Figure A II.1:** Schéma de l'appareillage et des systèmes d'acquisition et de contrôle.



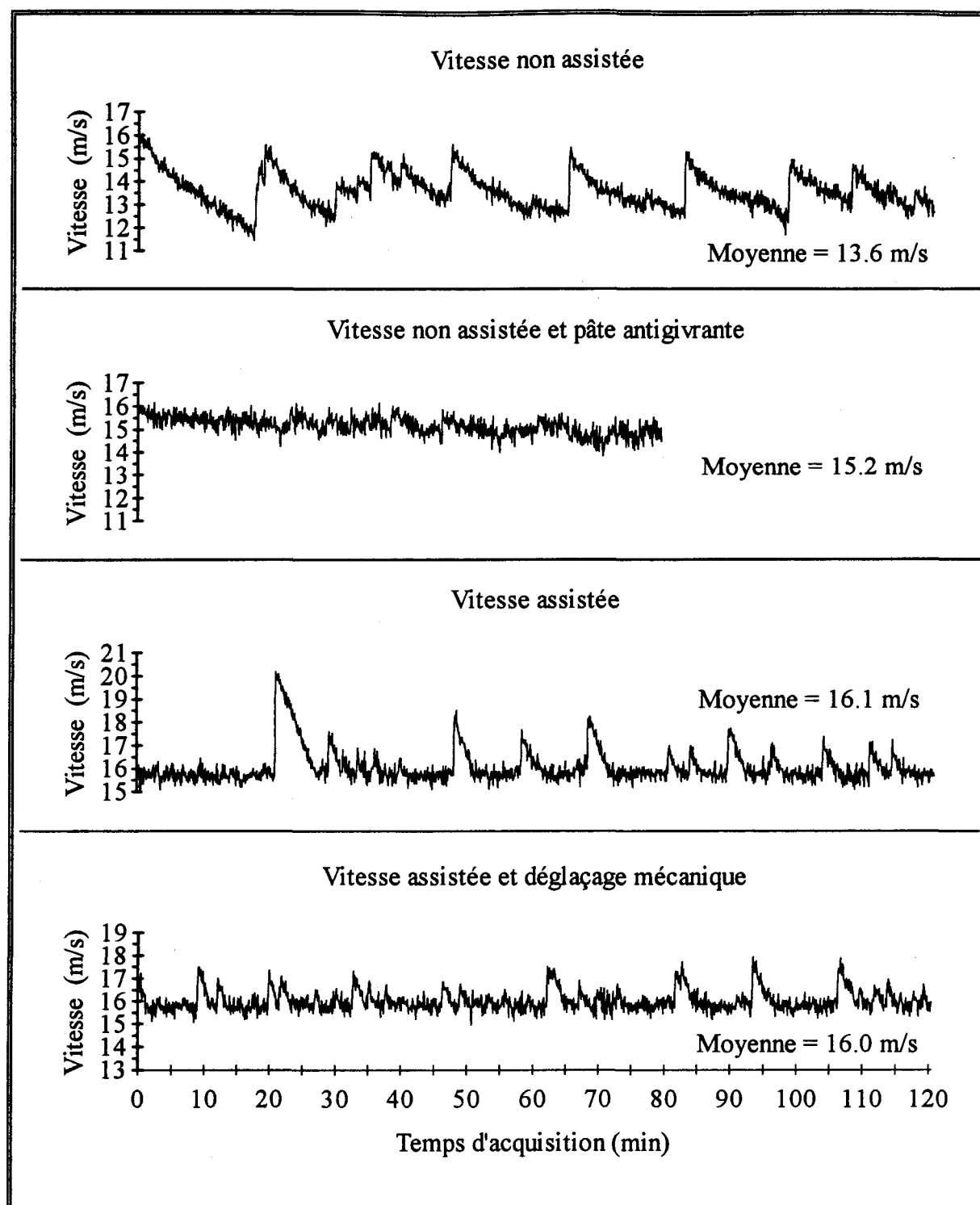


**Figure A II.2:** Circuits d'alimentation en eau et en air de la buse de pulvérisation.

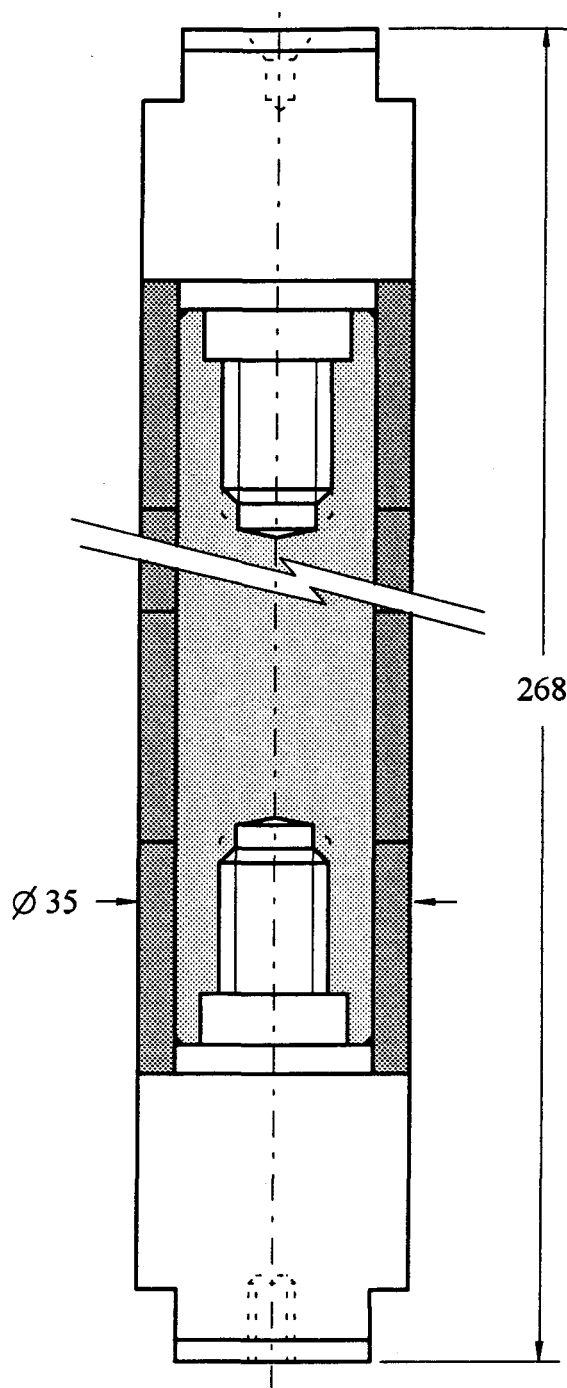


**Figure A II.3:** Profil des vitesses de l'air en présence d'un collecteur de 30,4 mm.

- Points de lecture (×) et vitesse en m/s indiquée entre parenthèses. Les dimensions sont exprimées en mm.
- Les valeurs des vitesses aux points de lecture indiqués par des lettres sont données dans le tableau A I.2.
- La vitesse de l'air au point a a été initialement ajustée à 14,5 m/s sans collecteur.

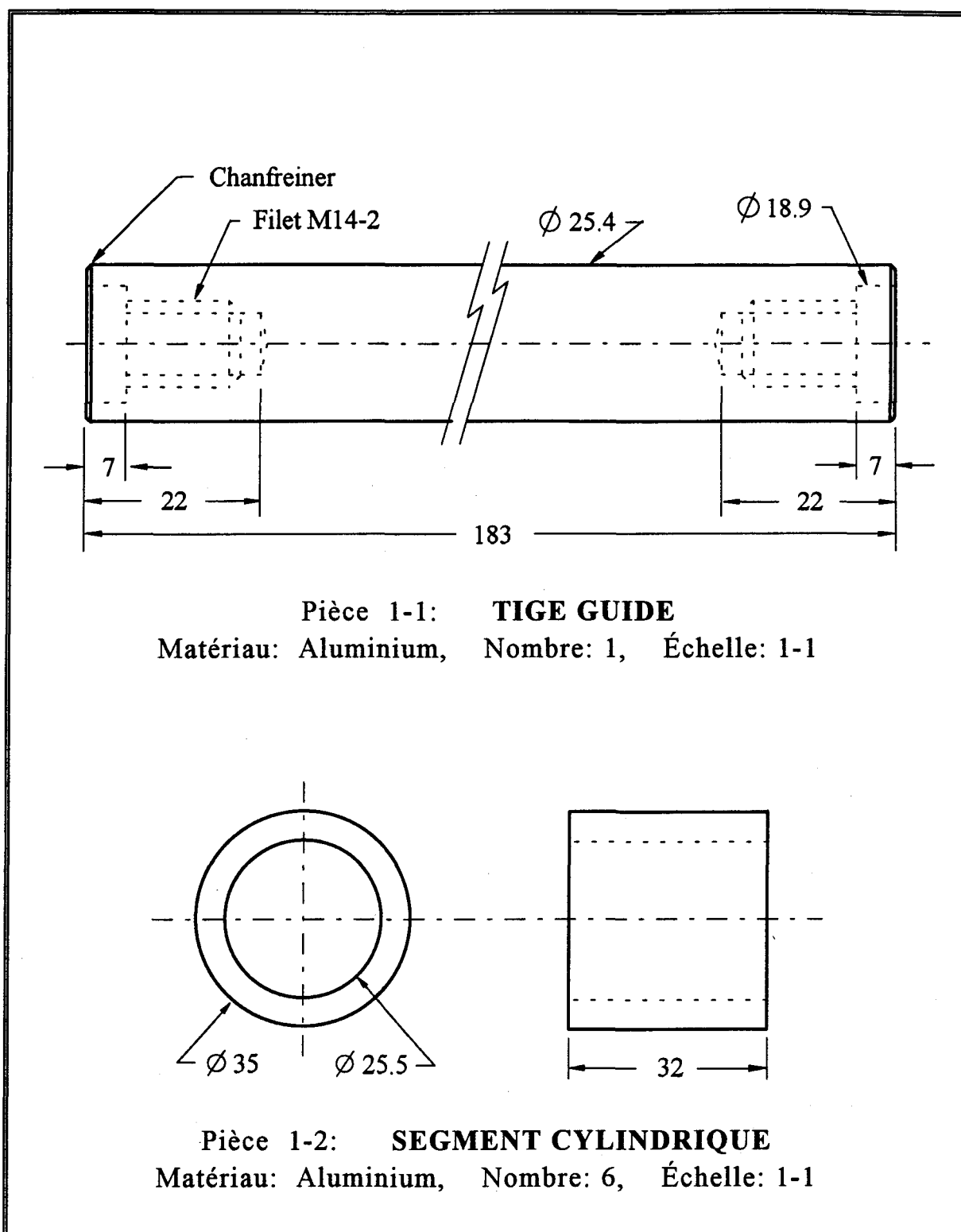


**Figure A II.4:** Variation de la vitesse de l'air pour quatre différents modes de fonctionnement de la soufflerie dans les mêmes conditions de formation de la glace.

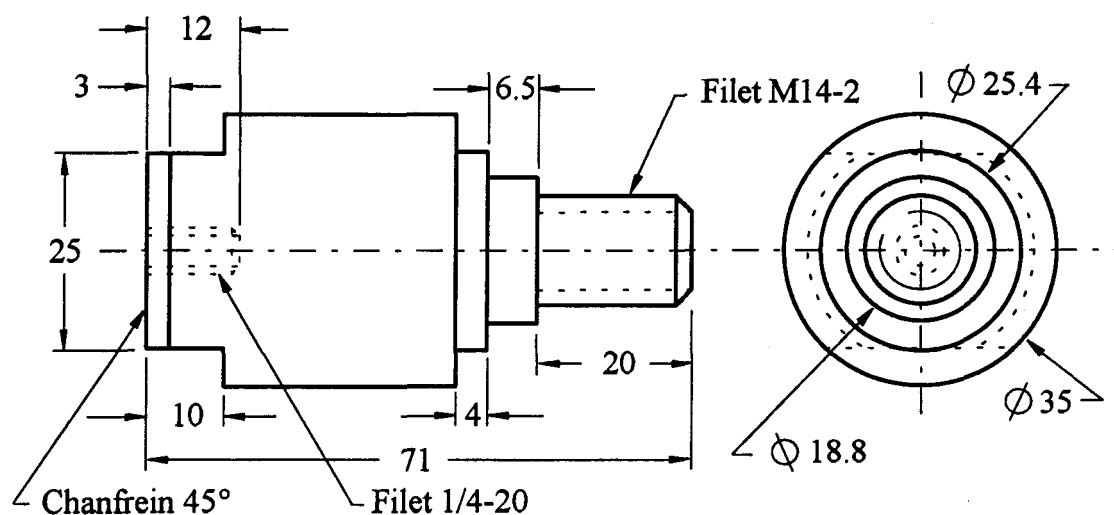


Pièce 1: **COLLECTEUR CYLINDRIQUE**  
Assemblage, Échelle: 1-1

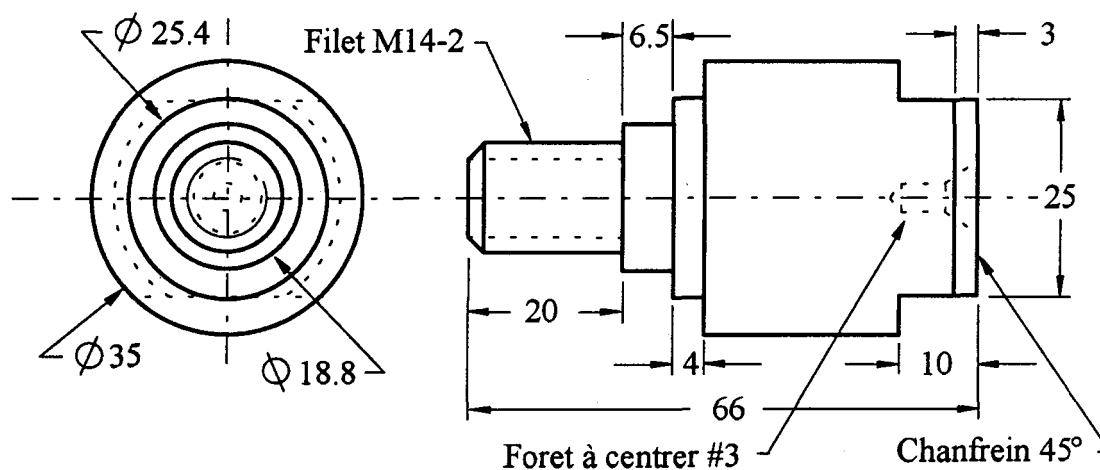
**Figure A II.5:** Assemblage du collecteur cylindrique (les dimensions sont exprimées en mm).



**Figure A II.6:** Tige guide et segment cylindrique du collecteur (les dimensions sont exprimées en mm).

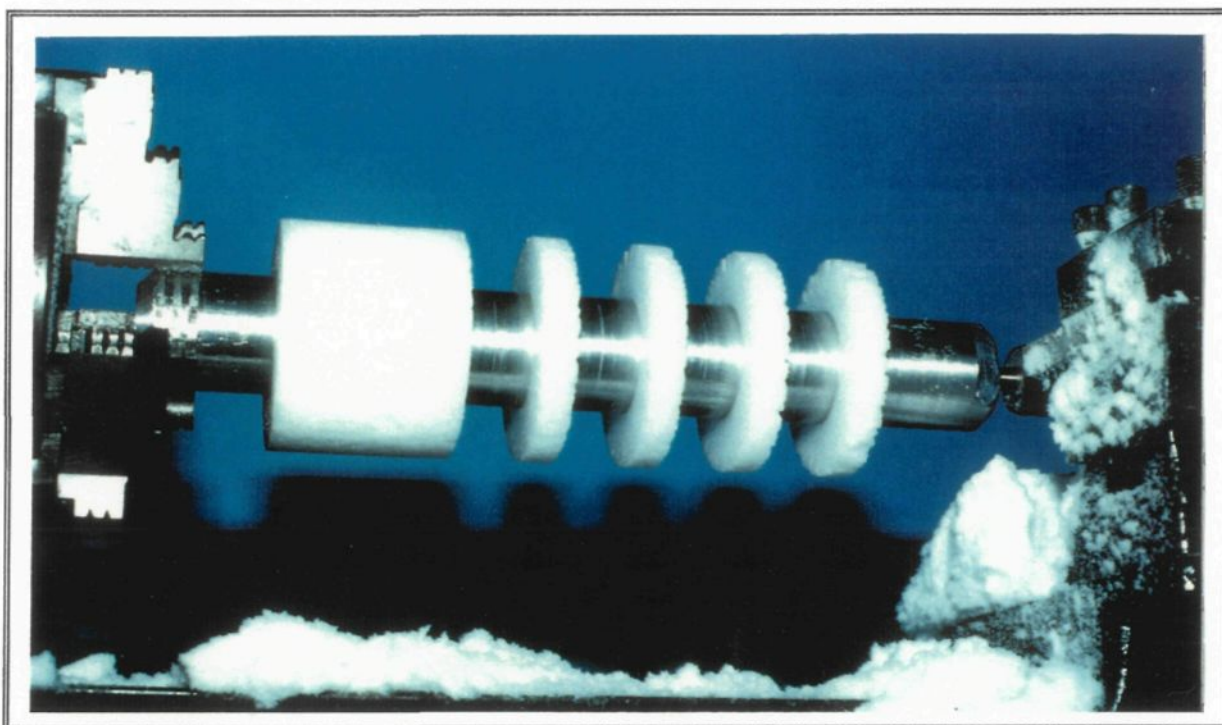


Pièce 1-3: **EMBOUT GAUCHE**  
 Matériau: Aluminium, Nombre: 1, Échelle: 1-1

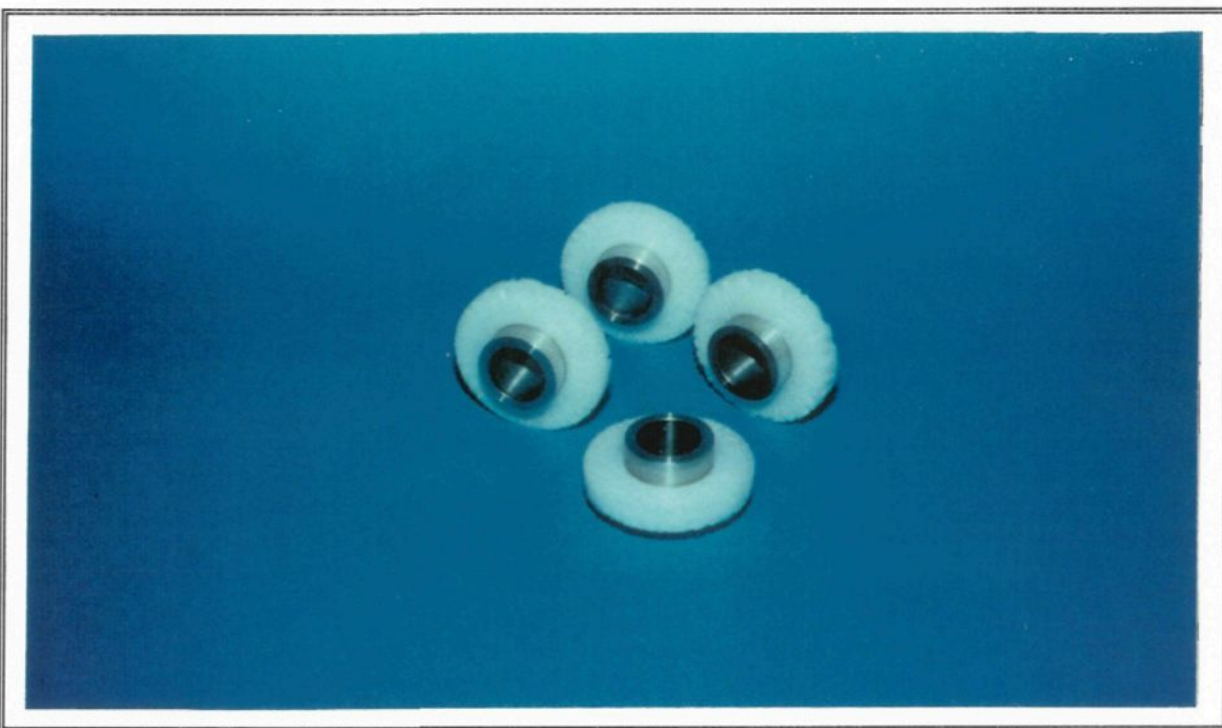


Pièce 1-4: **EMBOUT DROIT**  
 Matériau: Aluminium, Nombre: 1, Échelle: 1-1

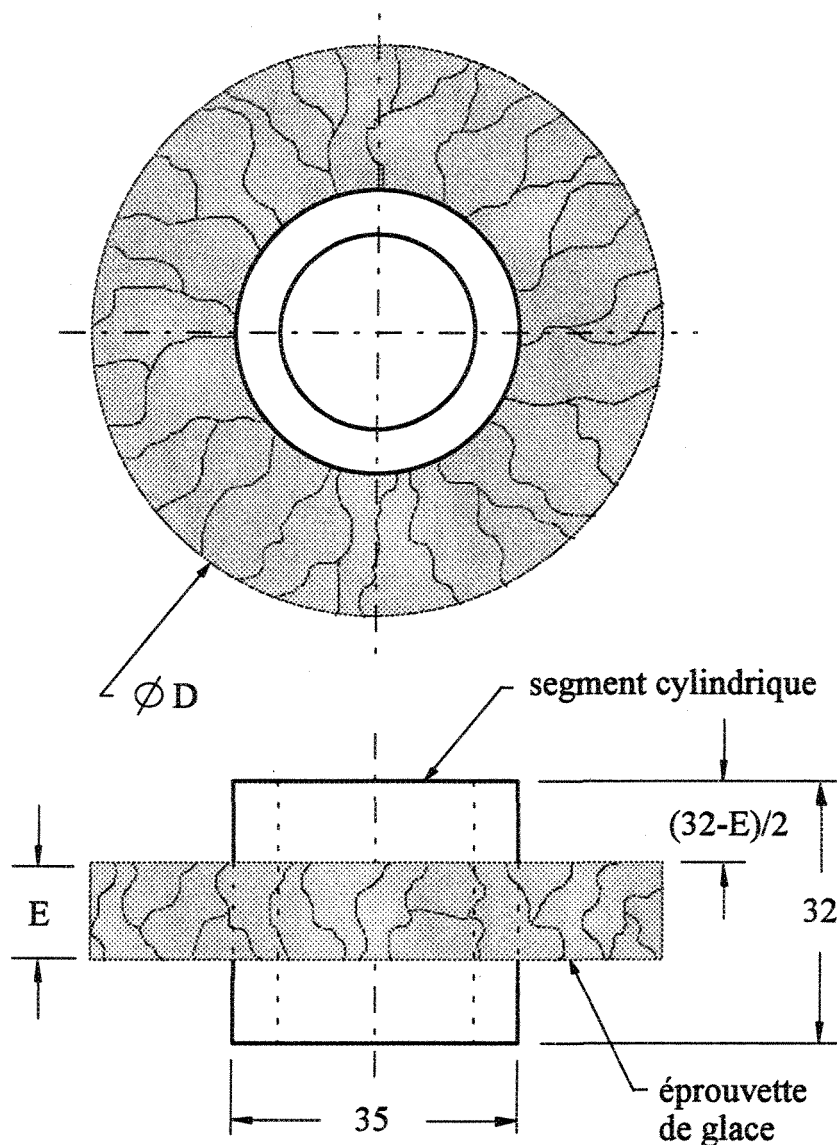
**Figure A II.7:** Embouts droit et gauche du collecteur (les dimensions sont exprimées en mm).



**Figure A II.8:** Façonnage des éprouvettes sur le tour parallèle.



**Figure A II.9:** Éprouvettes après le démontage du collecteur.



Épaisseurs (E) des éprouvettes: 8, 10 ou 12 mm

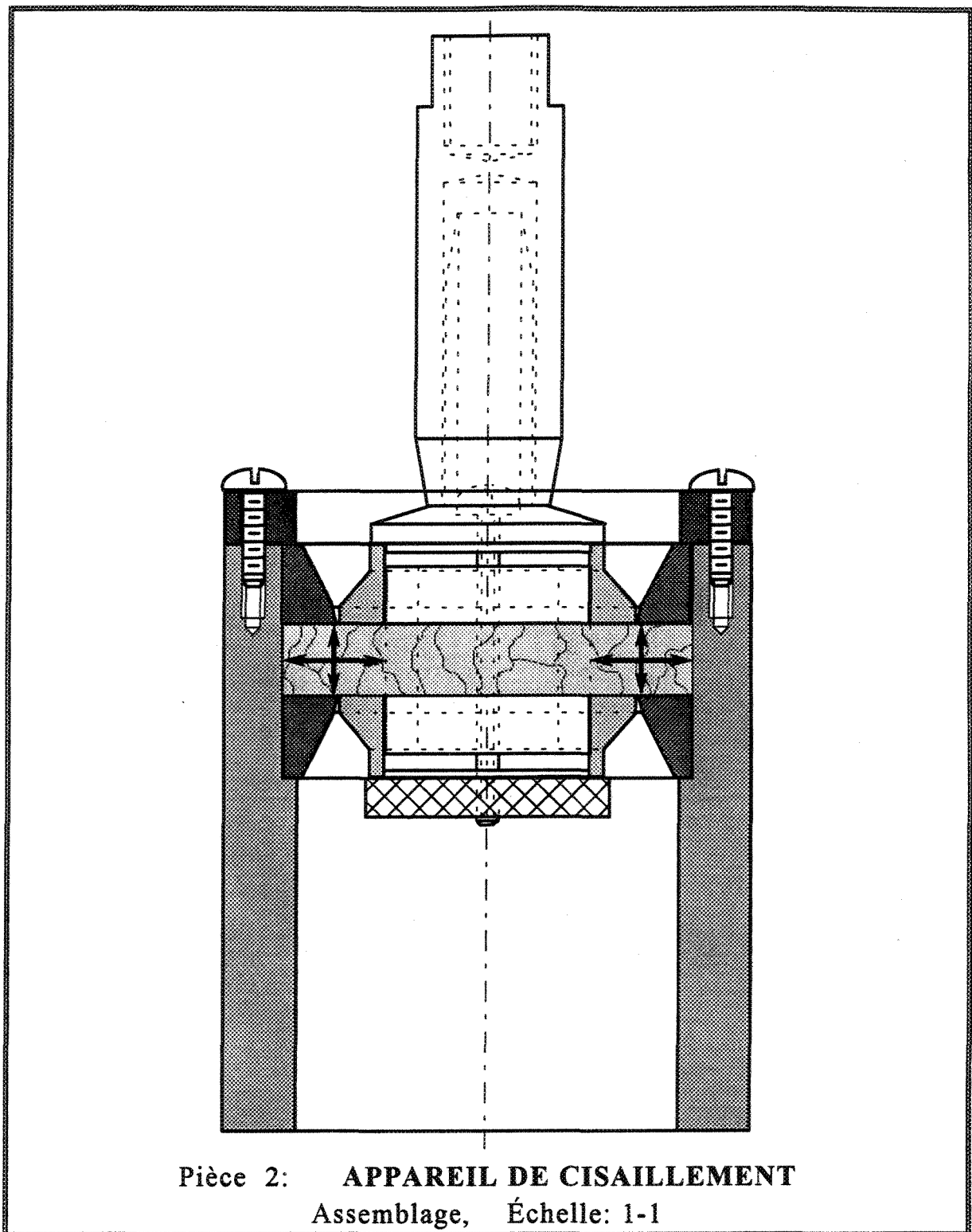
Diamètres (D) des éprouvettes: - en confinement partiel, 68 mm  
- en confinement total, 70 mm

### ÉPROUVETTE ET SEGMENT CYLINDRIQUE

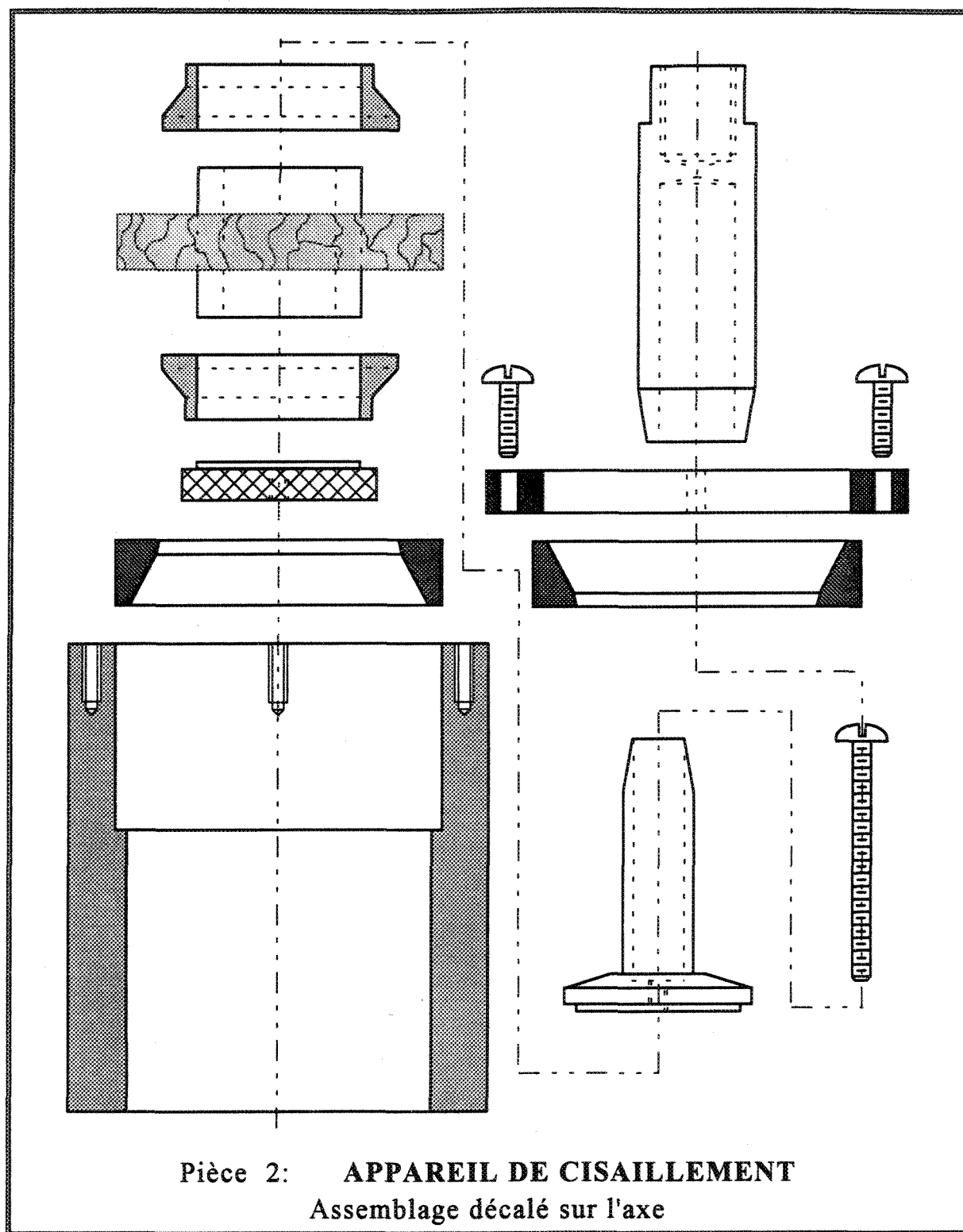
Échelle: 1-1

**Figure A II.10:** Dimensions des éprouvettes de glace (les dimensions sont exprimées en mm).

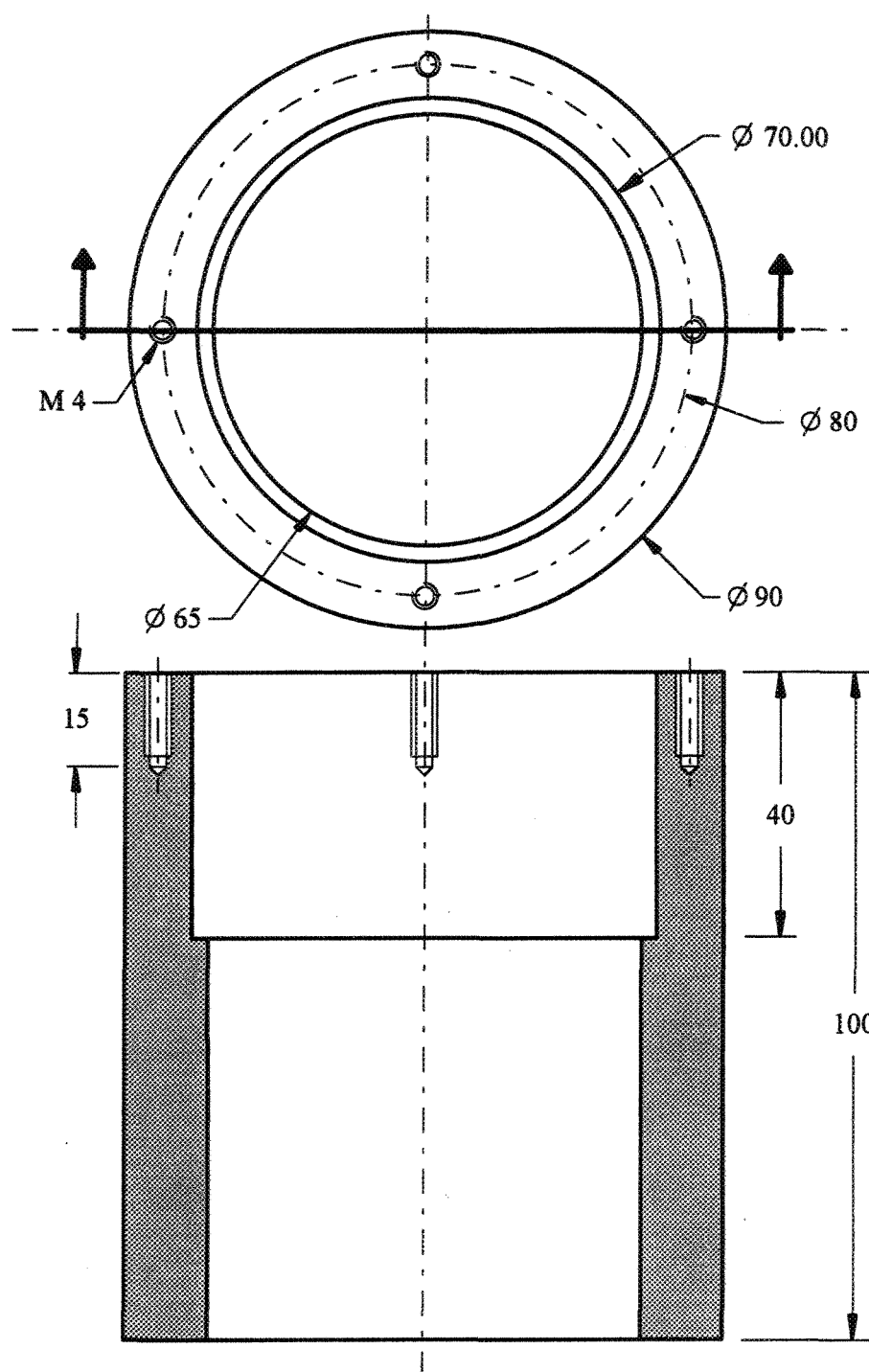




**Figure A II.11:** Assemblage de l'appareil de cisaillement avec le segment cylindrique et l'éprouvette de glace.

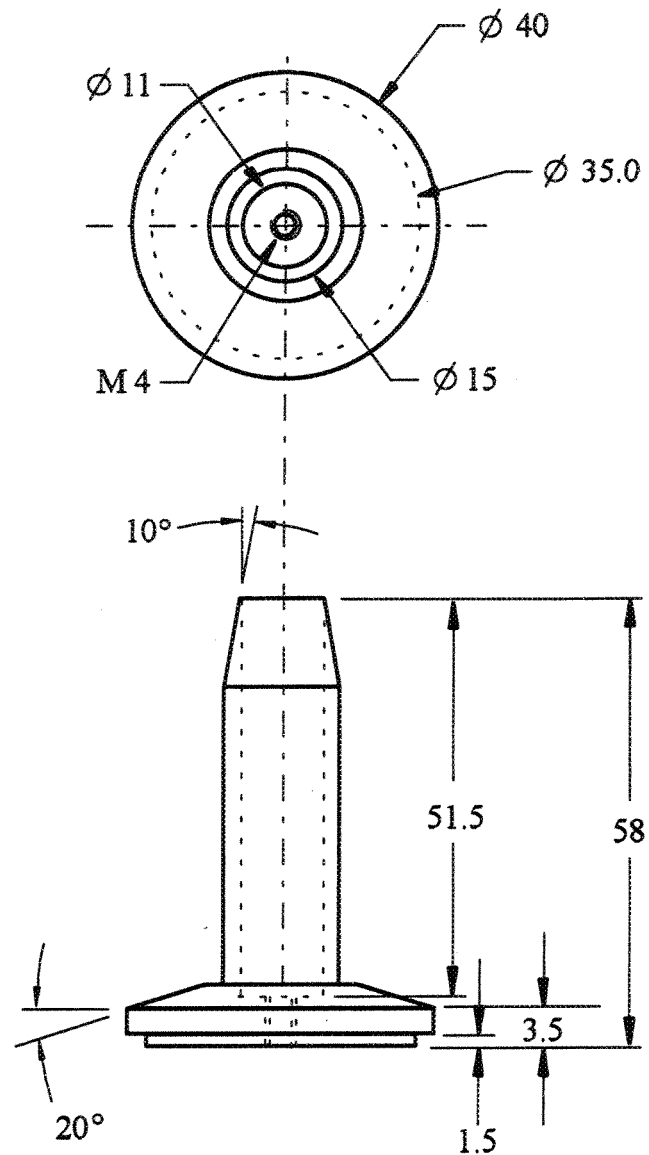


**Figure A II.12:** Assemblage décalé sur l'axe de l'appareil de cisaillement.

Pièce 2-1: **CORPS PRINCIPAL**

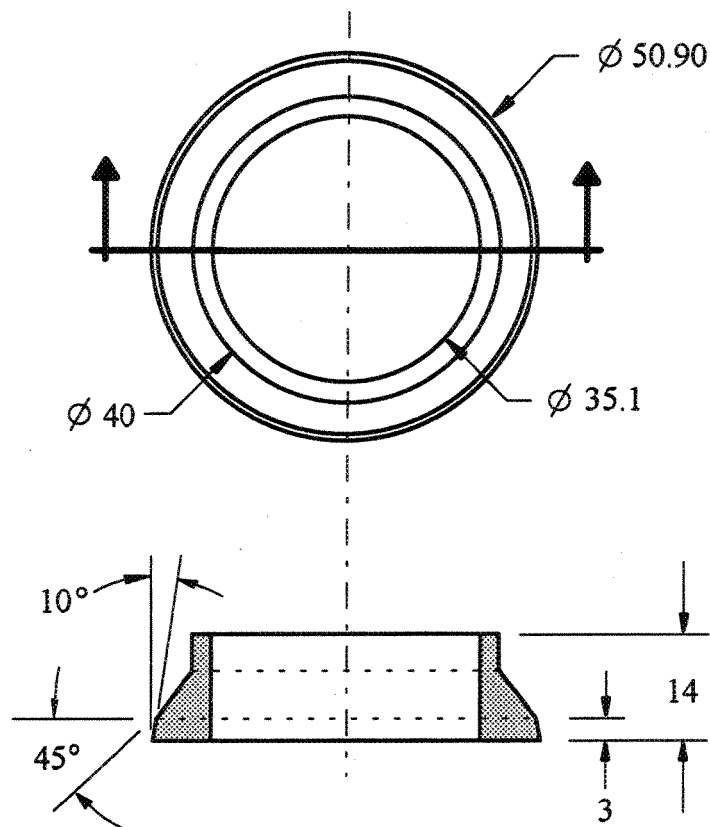
Matériau: Aluminium, Nombre: 1, Échelle: 1-1

**Figure A II.13:** Corps principal de l'appareil de cisaillement (les dimensions sont exprimées en mm).

Pièce 2-2: **TIGE GUIDE**

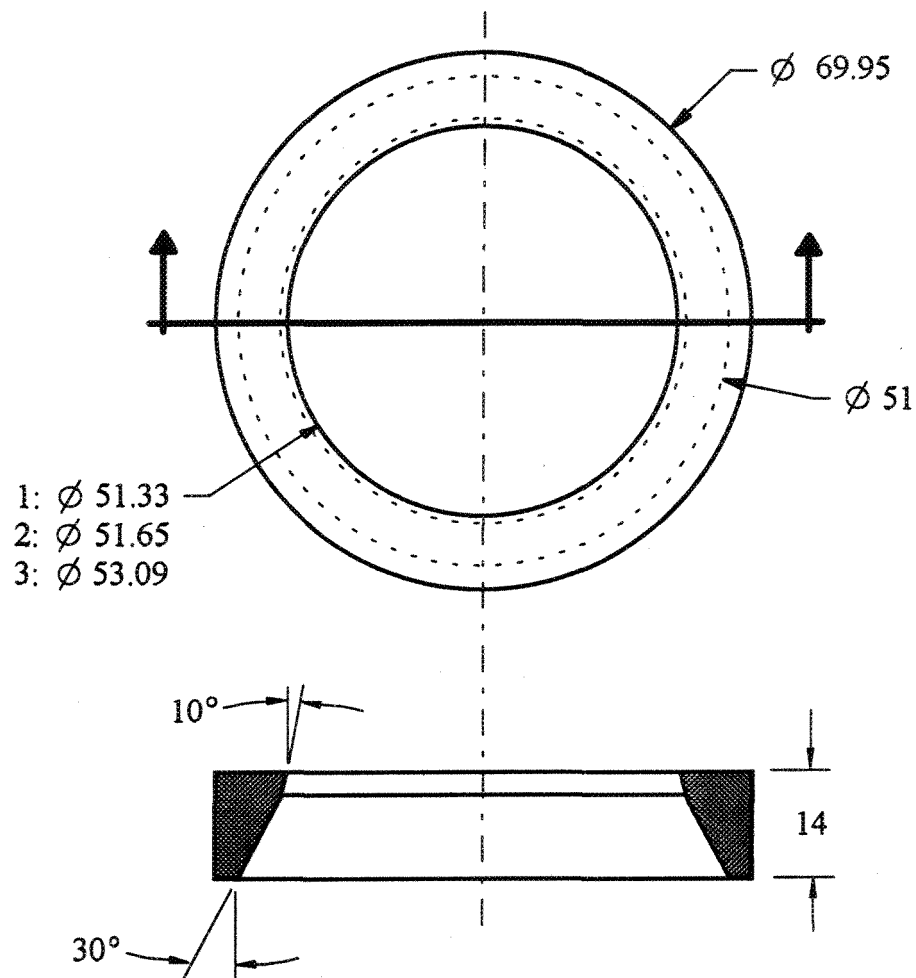
Matériau: Aluminium, Nombre: 1, Échelle: 1-1

**Figure A II.14:** Tige guide de l'appareil de cisaillement (les dimensions sont exprimées en mm).



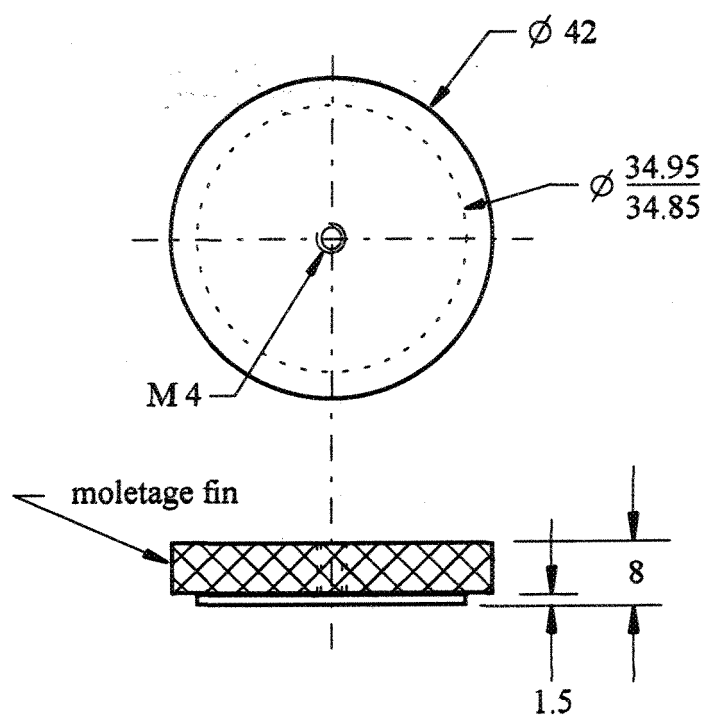
Pièce 2-3: **BAGUE D'APPUI DU POINÇON**  
Matériau: Aluminium, Nombre: 2, Échelle: 1-1

**Figure A II.15:** Bague d'appui du poinçon de l'appareil de cisaillement (les dimensions sont exprimées en mm).



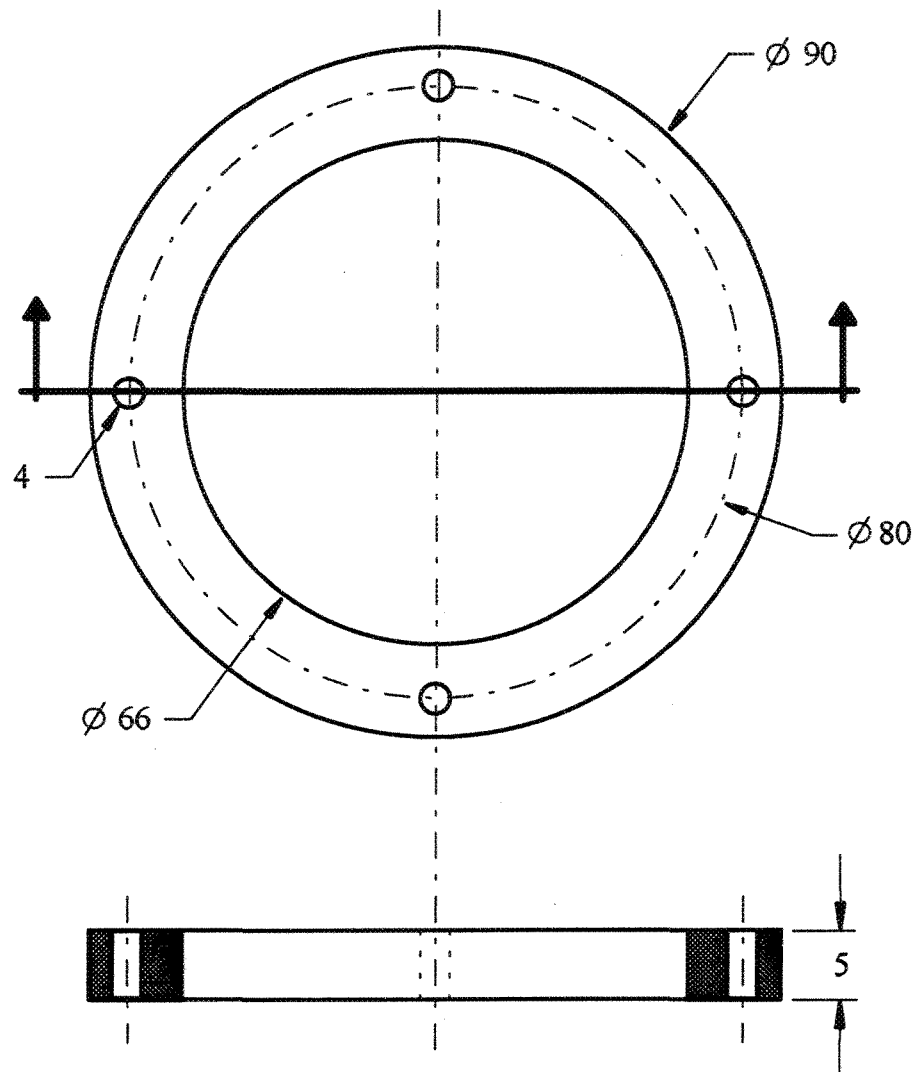
Pièce 2-4: **BAGUE D'APPUI DE LA MATRICE**  
 Matériau: Aluminium, Nombre: 3 paires, Échelle: 1-1

**Figure A II.16:** Bague d'appui de la matrice de l'appareil de cisaillement (les dimensions sont exprimées en mm).



Pièce 2-5: **ÉCROU MOLETÉ**  
Matériau: Aluminium, Nombre: 1, Échelle: 1-1

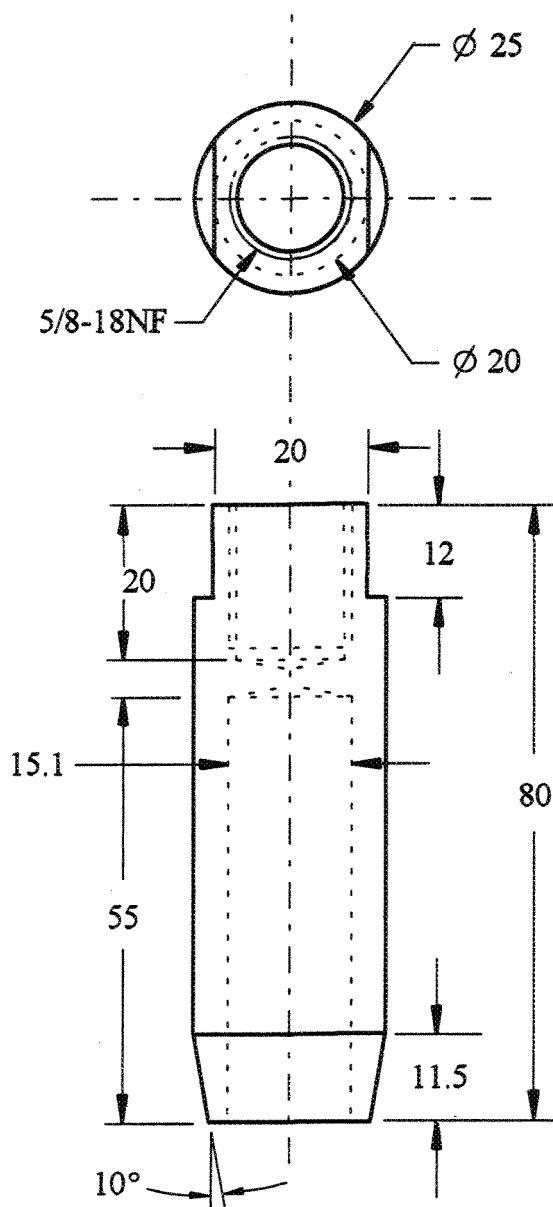
**Figure A II.17:** Écrou moleté du poinçon de l'appareil de cisaillement  
(les dimensions sont exprimées en mm).



Pièce 2-6: **RONDELLE DE BLOCAGE**  
Matériau: Aluminium, Nombre: 1, Échelle: 1-1

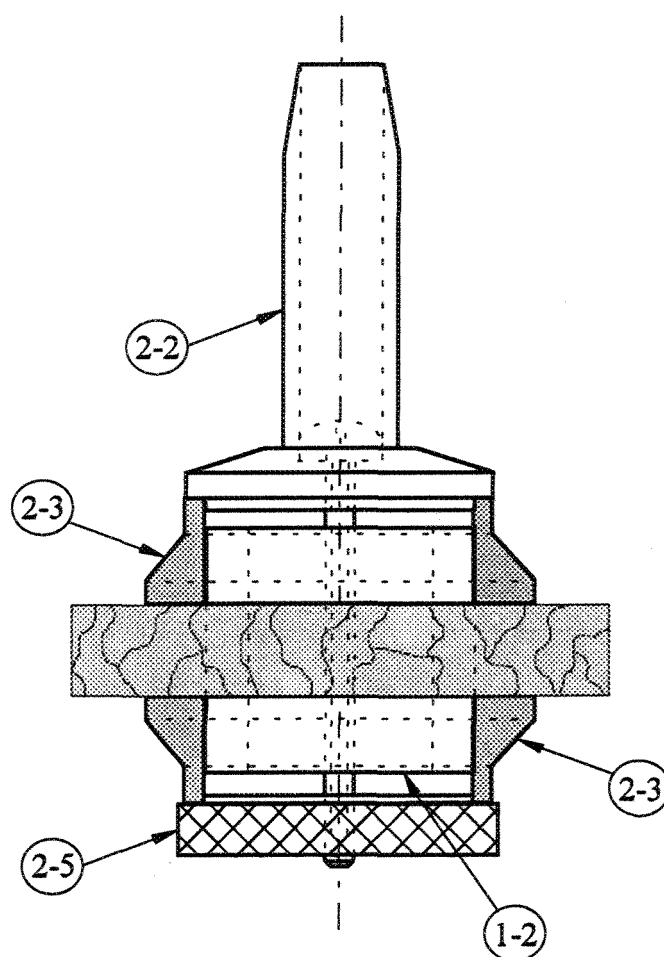
**Figure A II.18:** Rondelle de blocage de l'appareil de cisaillement (les dimensions sont exprimées en mm).





Pièce 2-7: **ADAPTATEUR GUIDE**  
 Matériau: Aluminium, Nombre: 1, Échelle: 1-1

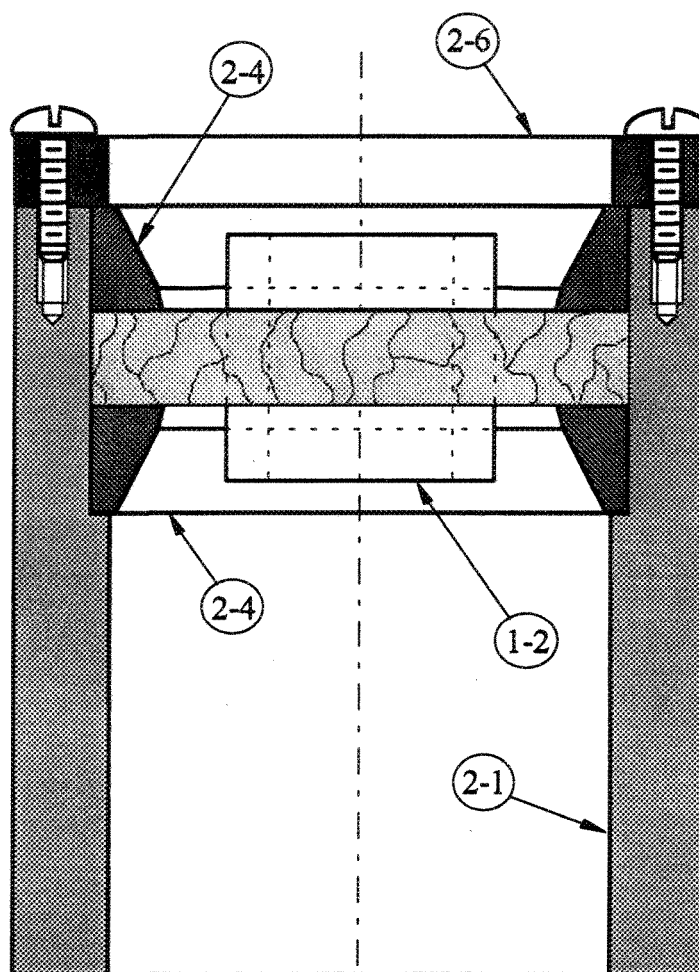
**Figure A II.19:** Adaptateur guide fixé à la cellule de charge de la presse (les dimensions sont exprimées en mm).



# ASSEMBLAGE DU POINÇON

Échelle: 1-1

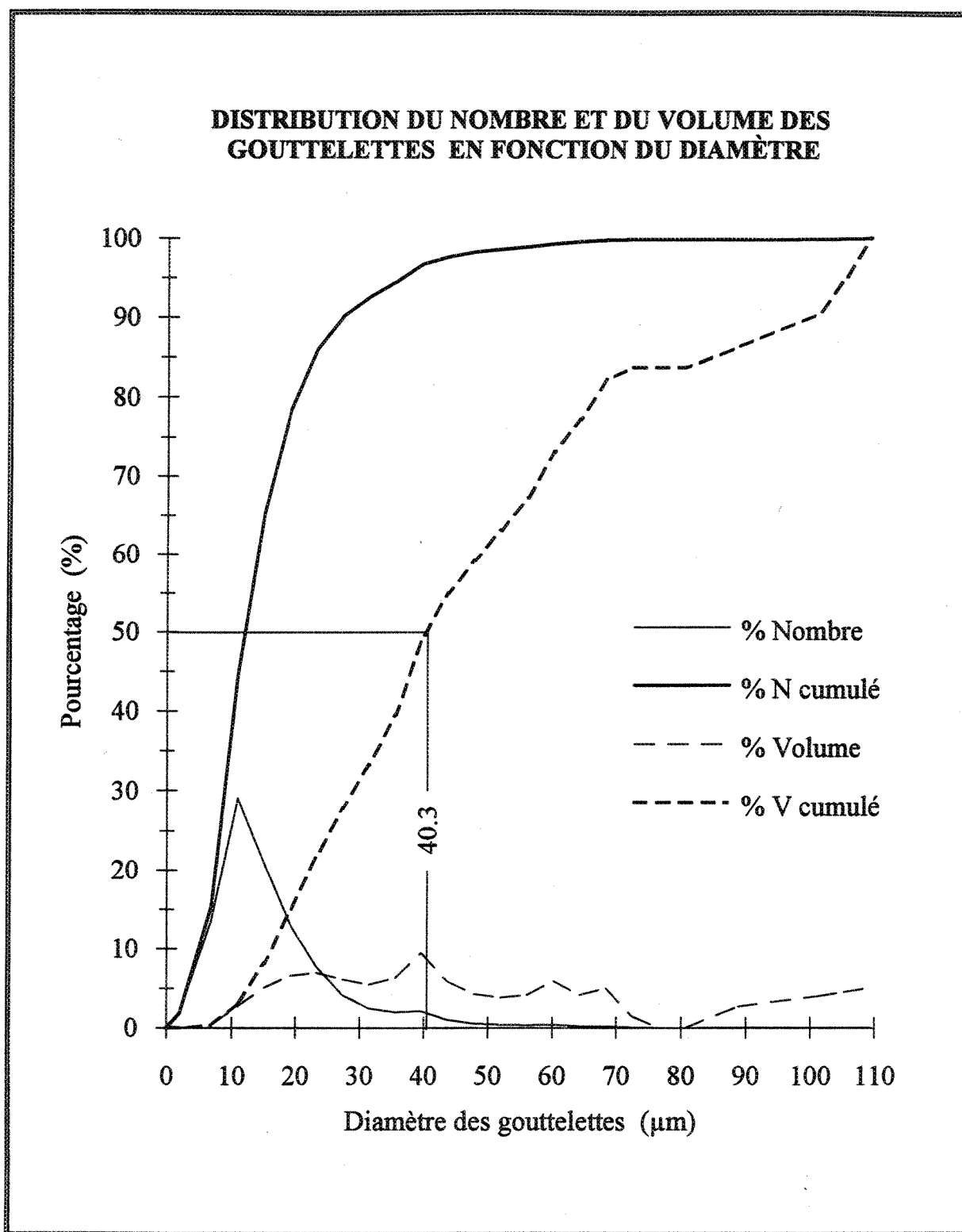
**Figure A II.20:** Assemblage des pièces du poinçon avec l'éprouvette de glace.



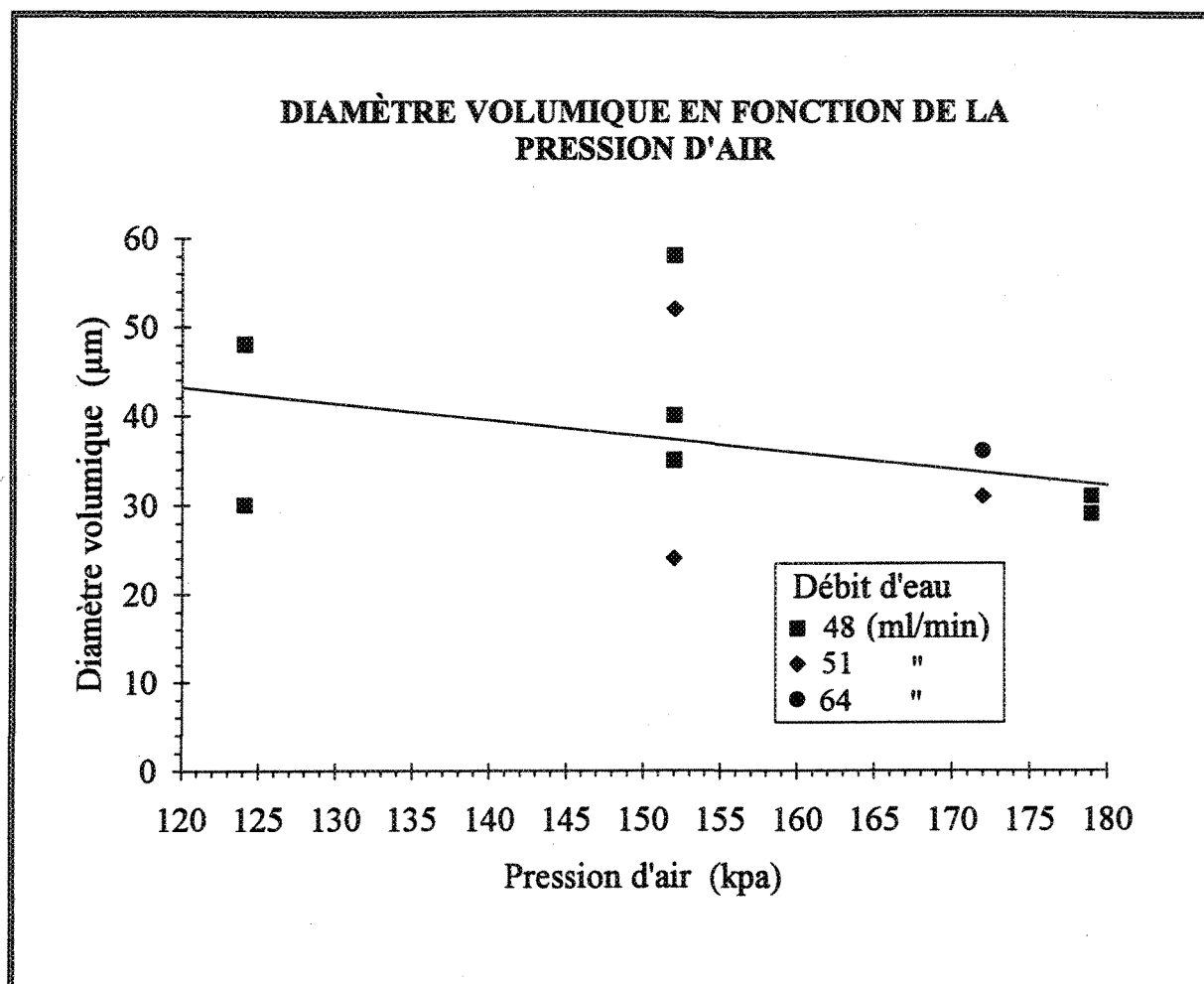
# ASSEMBLAGE DE LA MATRICE

Échelle: 1-1

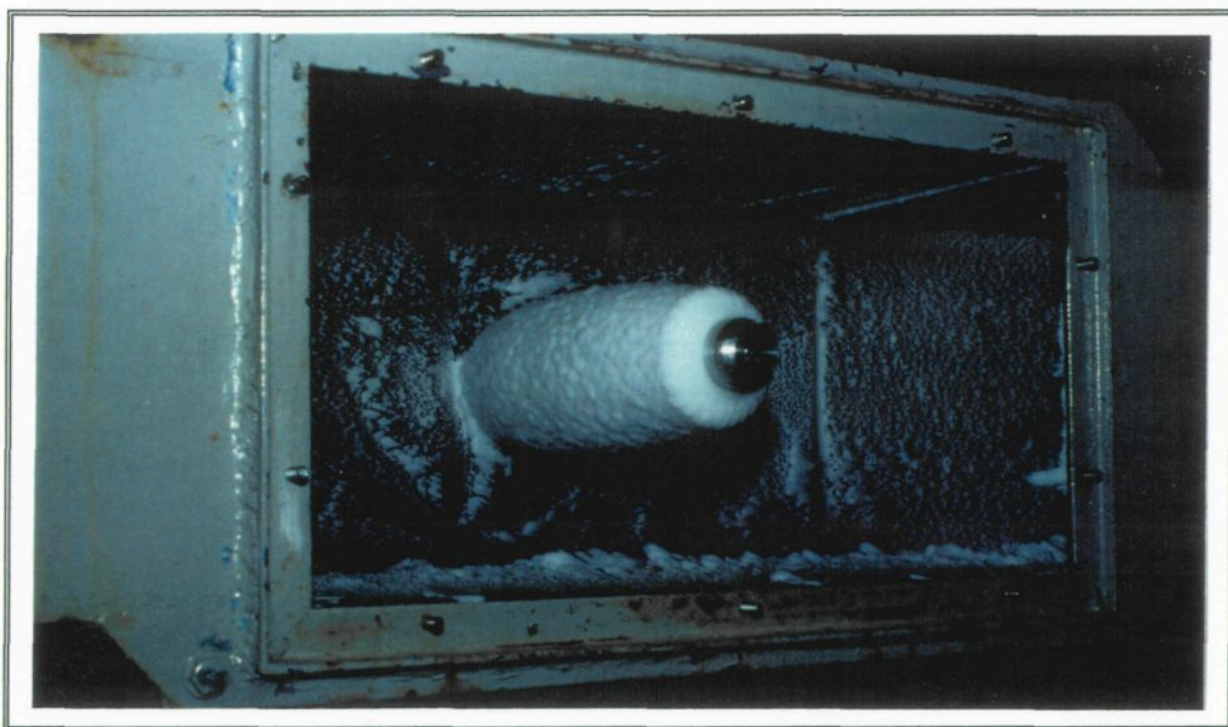
**Figure A II.21:** Assemblage des pièces de la matrice avec l'éprouvette de glace.



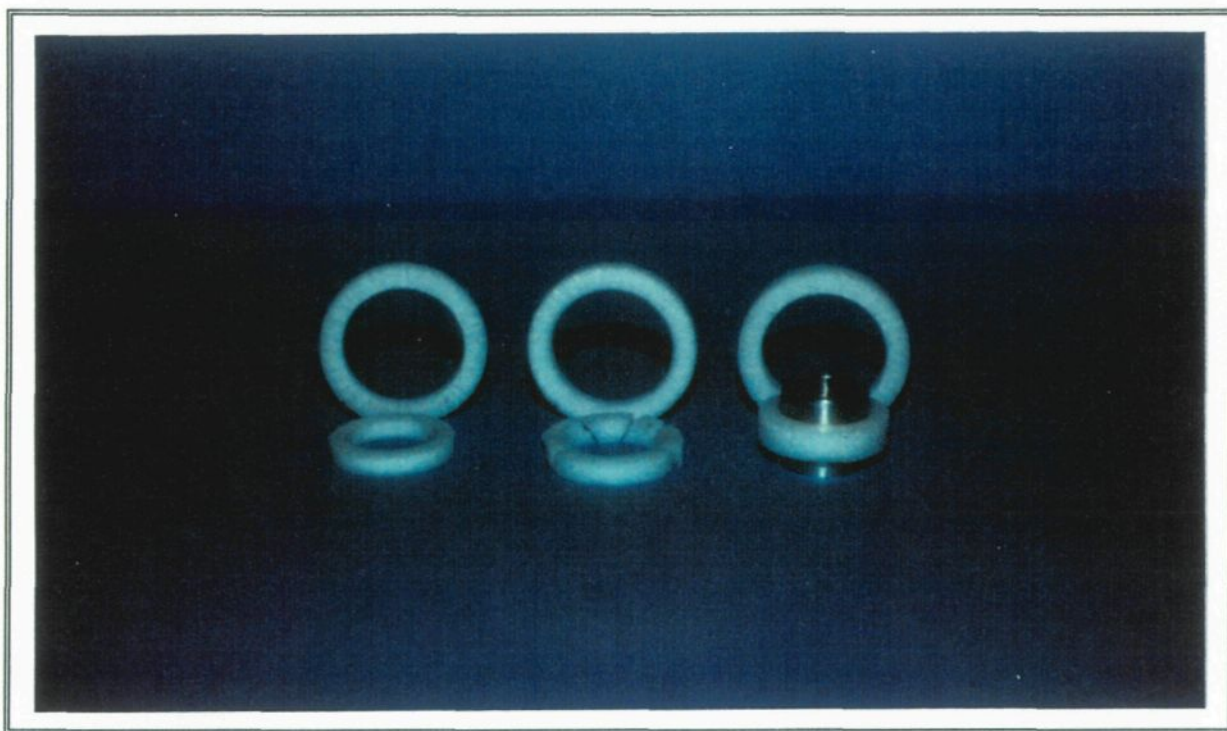
**Figure A II.22:** Graphique de la distribution du nombre et du volume des gouttelettes (valeurs inscrites au tableau A I.7).



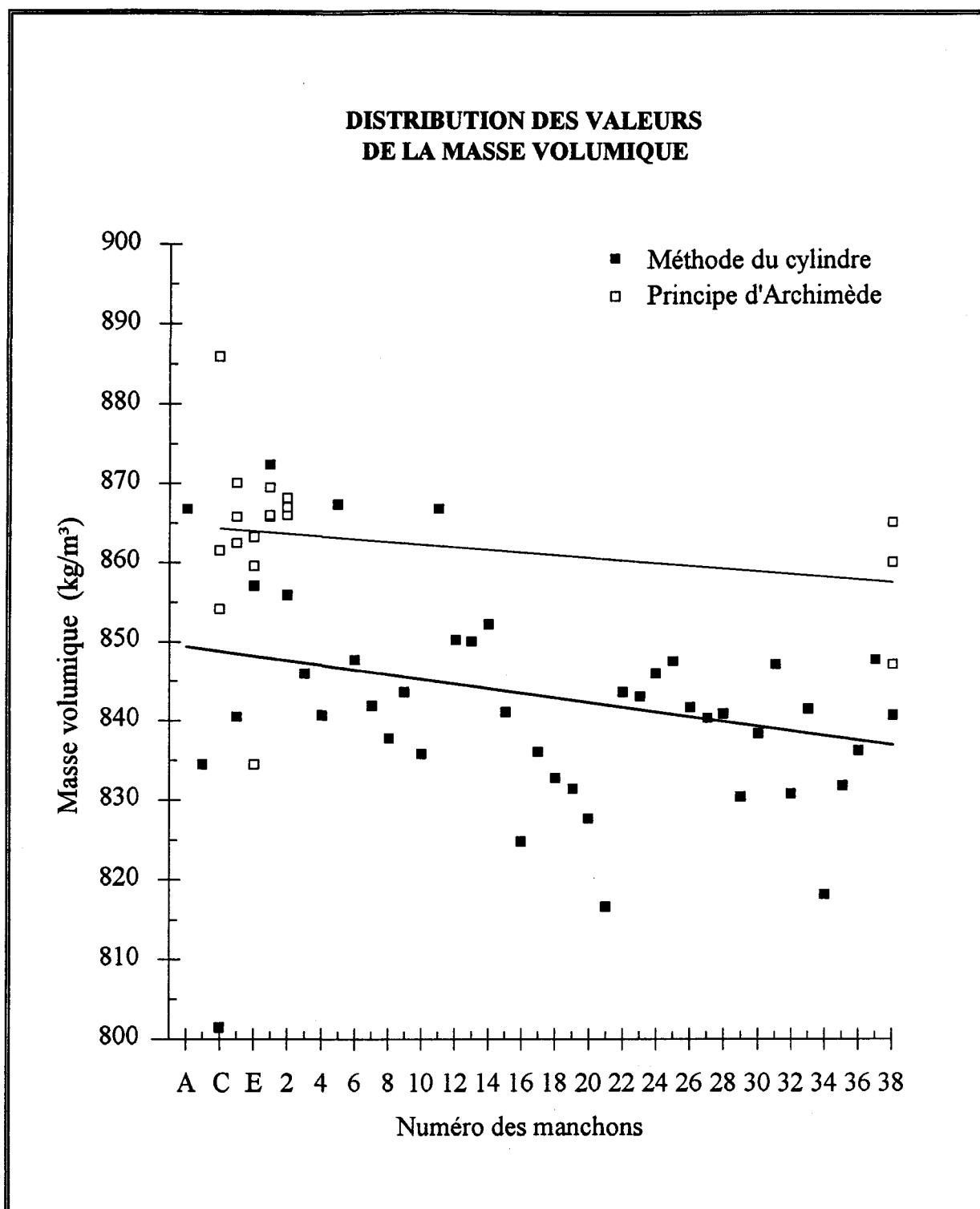
**Figure A II.23:** Position relative des valeurs des diamètres volumiques des gouttelettes en fonction de la pression d'air de la buse (valeurs inscrites au tableau A I.8).



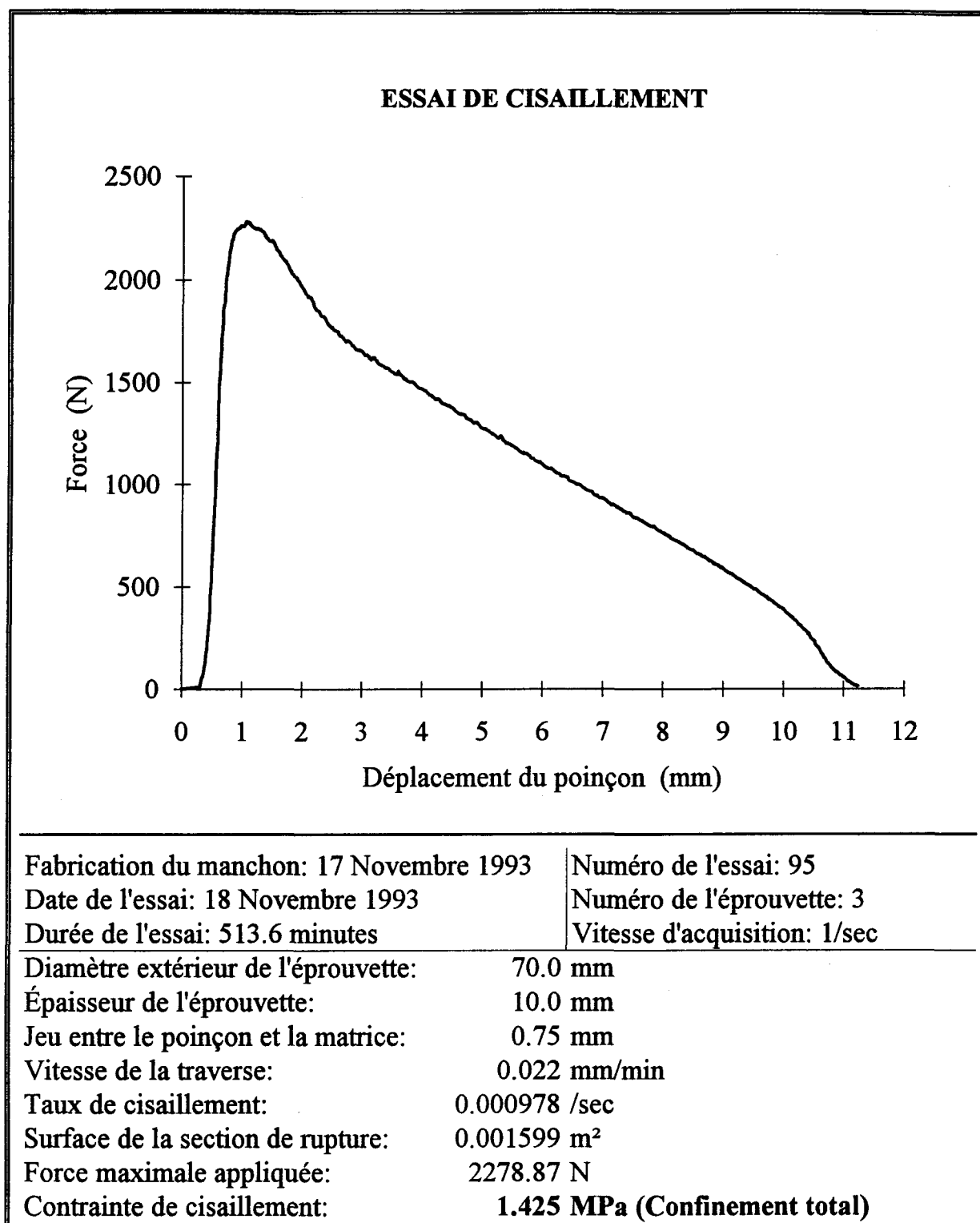
**Figure A II.24:** Photographie d'un manchon dans la section d'essais de la soufflerie.



**Figure A II.25:** Photographie des parties de quelques éprouvettes qui ont été rompues lors des essais de cisaillement.

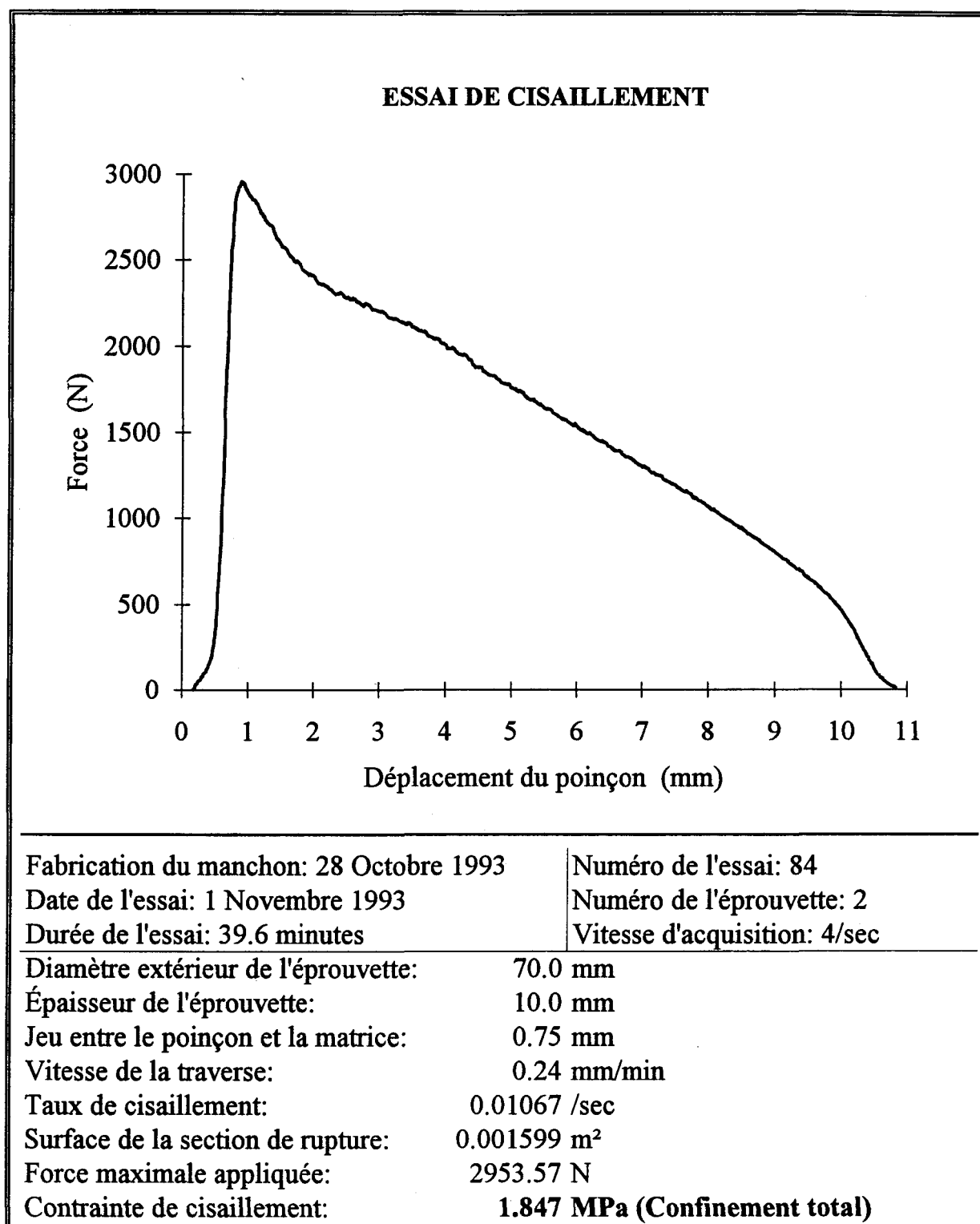


**Figure A II.26:** Distribution des valeurs de la masse volumique de la glace pour chacune des méthodes de mesure (valeurs inscrites au tableau A I.10 et A I.12).

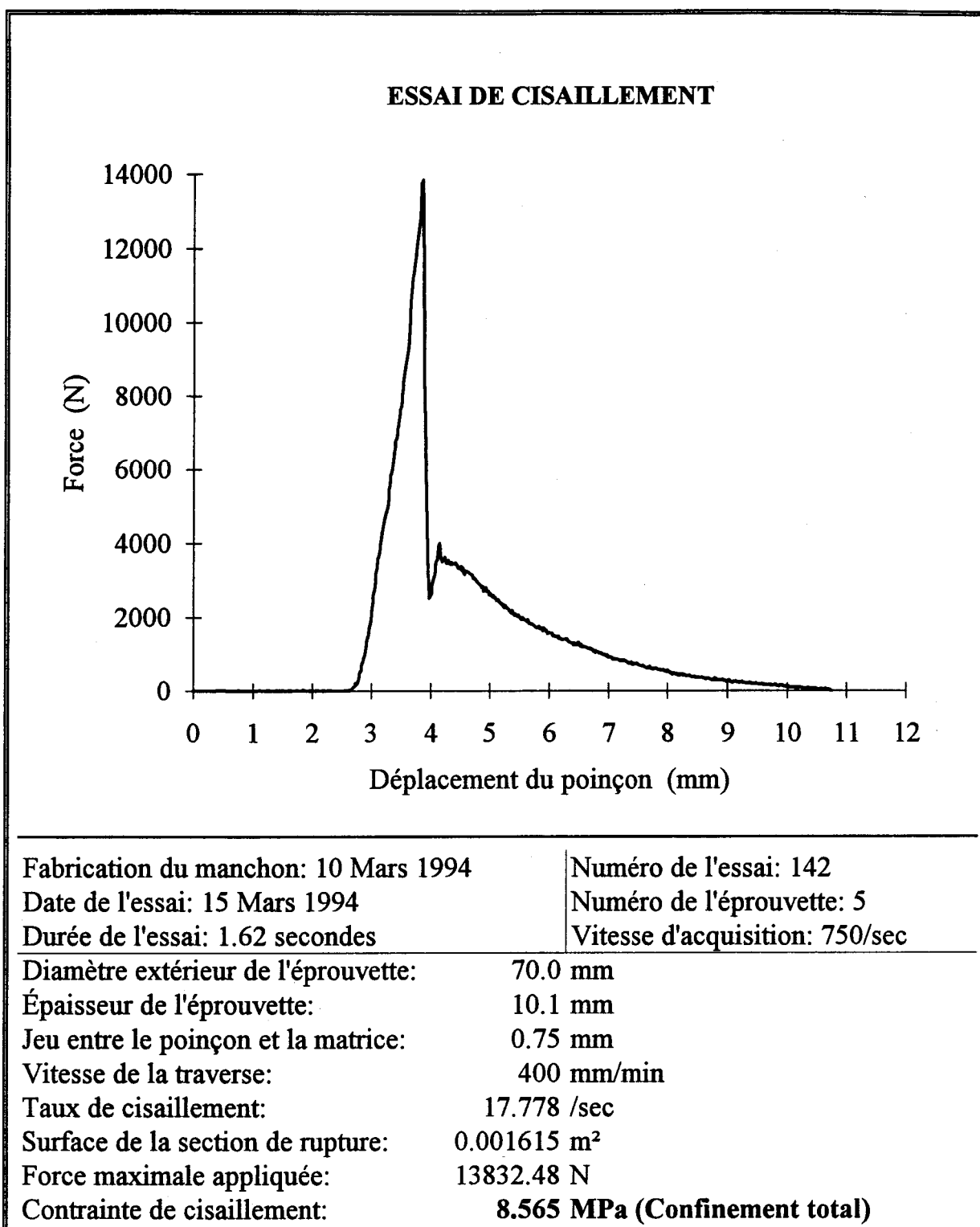


**Figure A II.27:** Essai de cisaillement en confinement total et à taux de déformation lent de l'éprouvette.

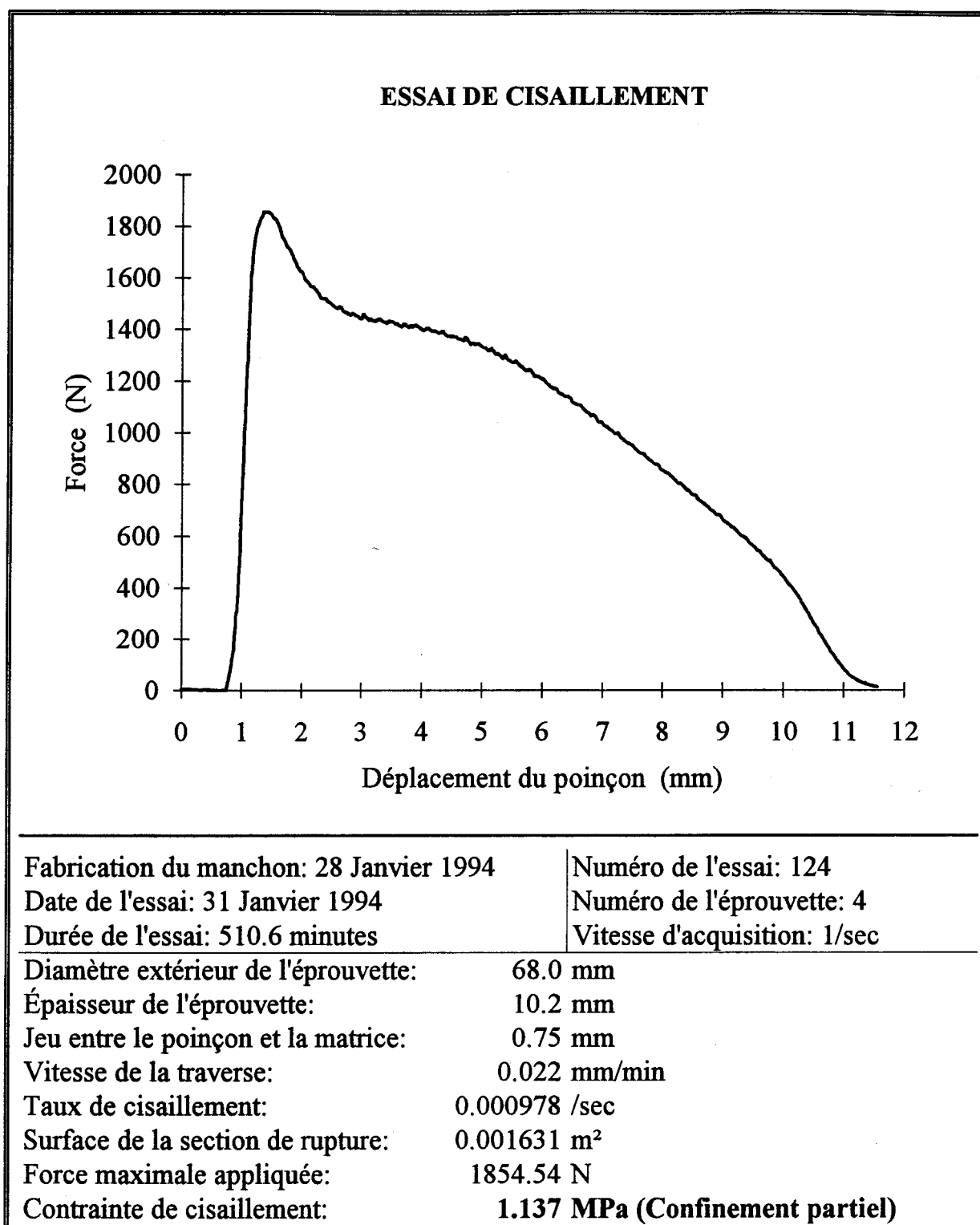




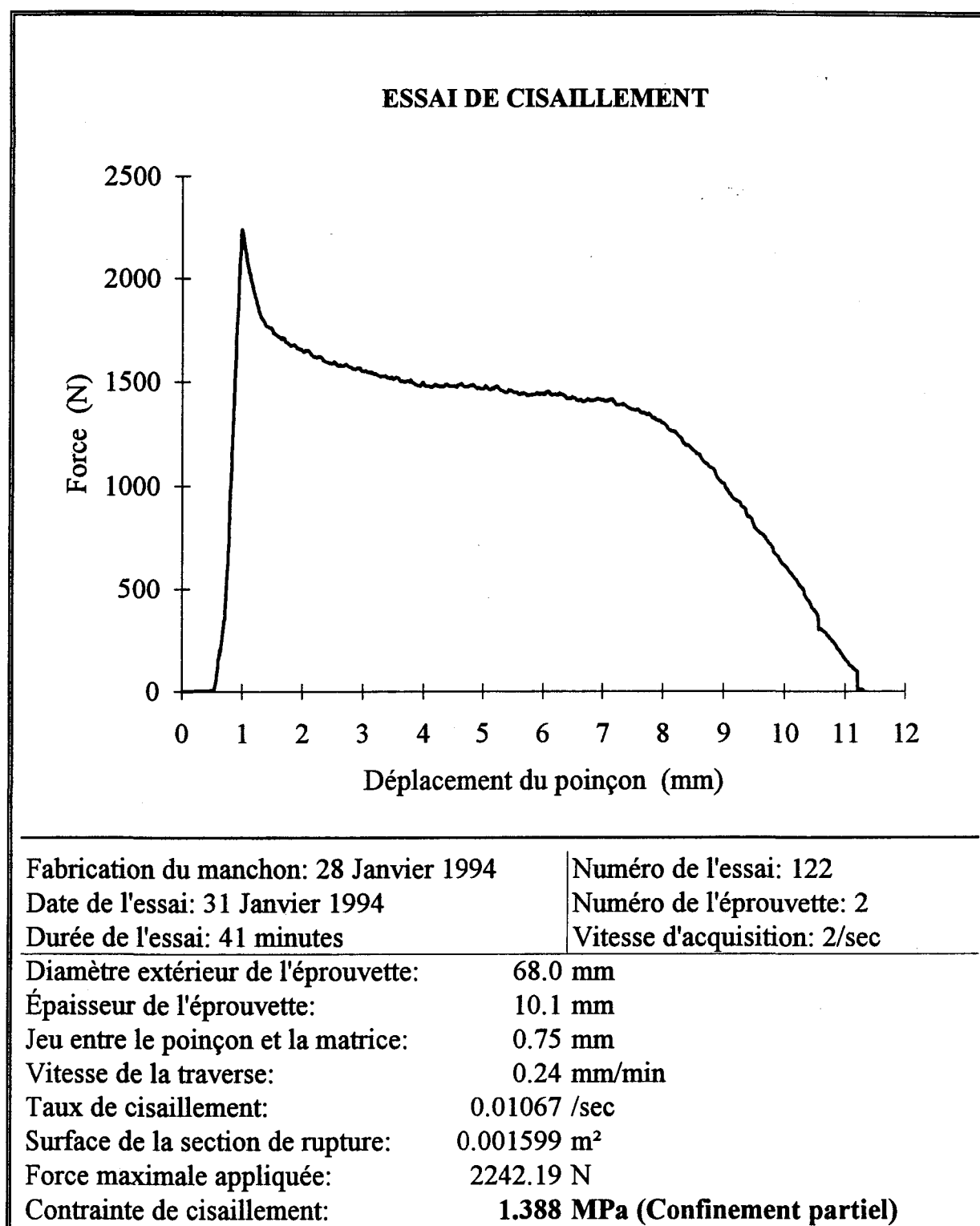
**Figure A II.28:** Essai de cisaillement en confinement total et à taux de déformation intermédiaire de l'éprouvette.



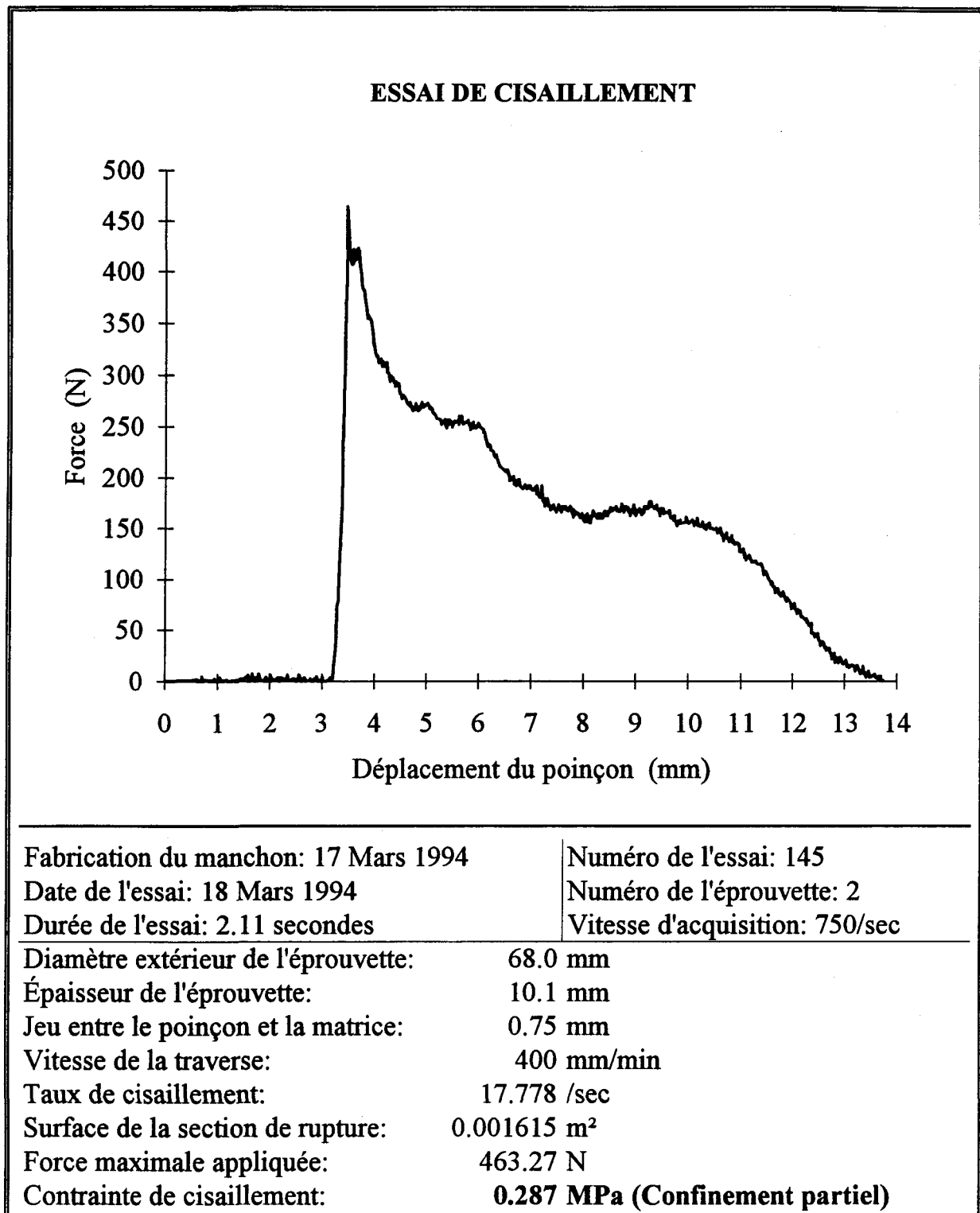
**Figure A II.29:** Essai de cisaillement en confinement total et à taux de déformation rapide de l'éprouvette.



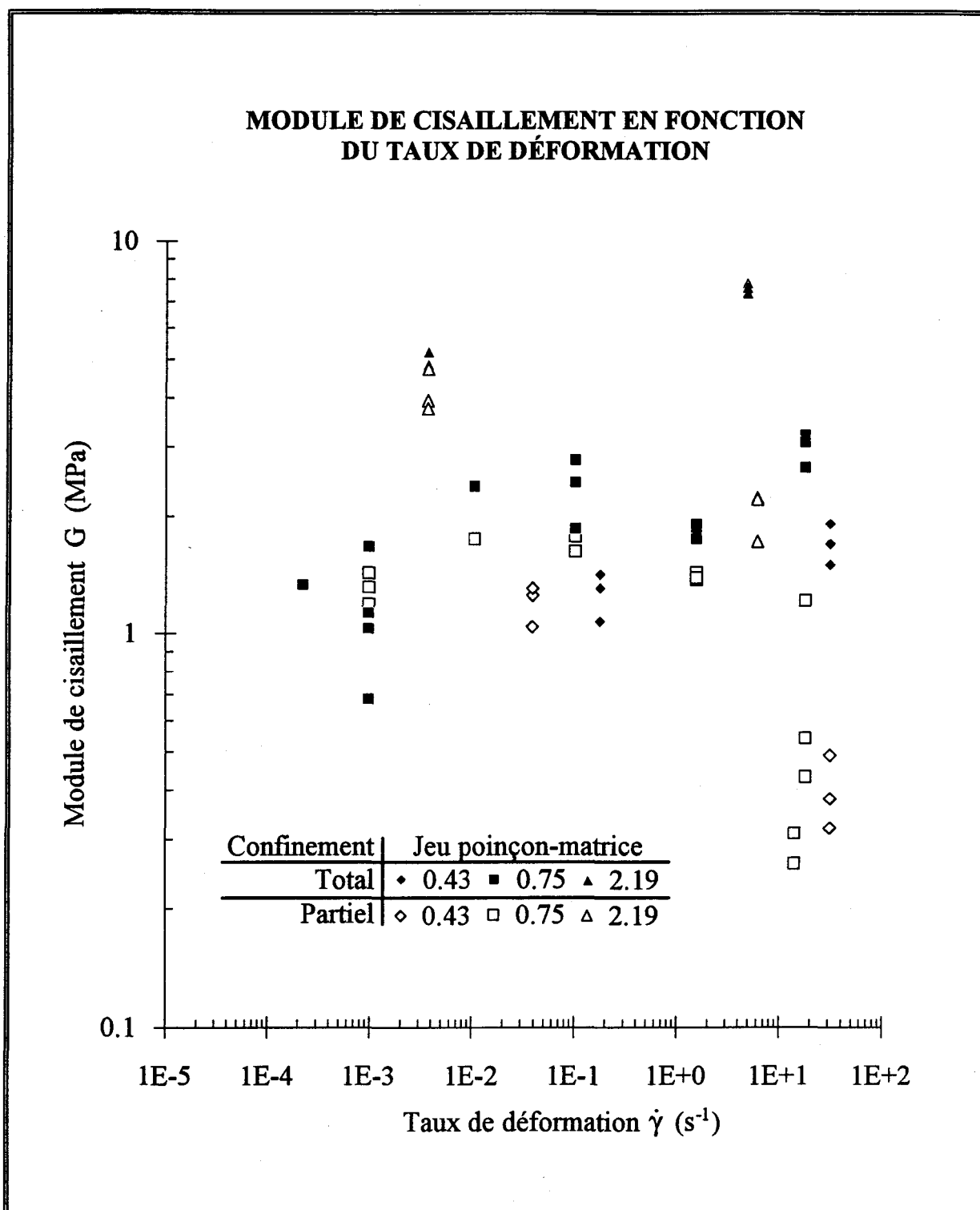
**Figure A II.30:** Essai de cisaillement en confinement partiel et à taux de déformation lent de l'éprouvette.



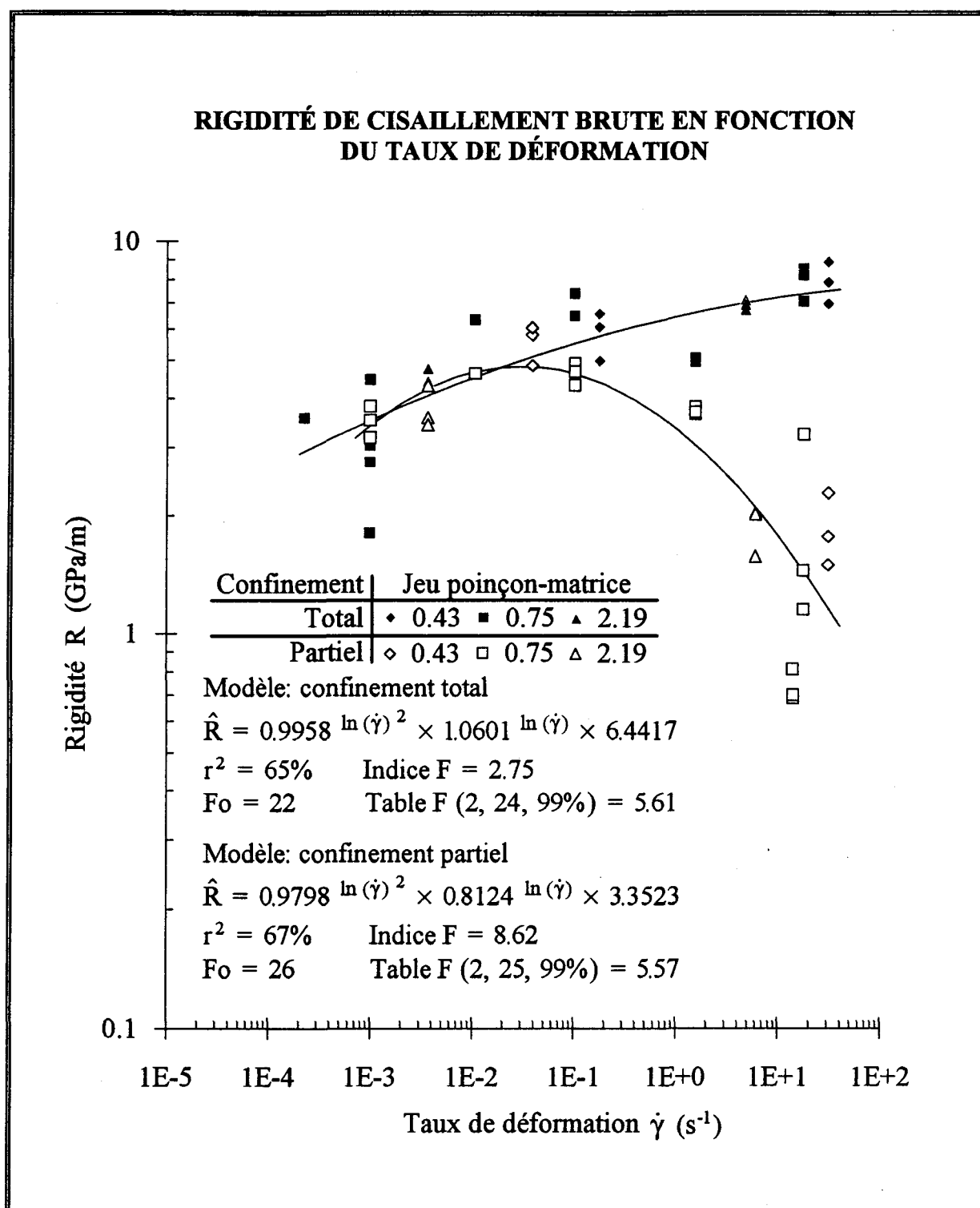
**Figure A II.31:** Essai de cisaillement en confinement partiel et à taux de déformation intermédiaire de l'éprouvette.



**Figure A II.32:** Essai de cisaillement en confinement partiel et à taux de déformation rapide de l'éprouvette.

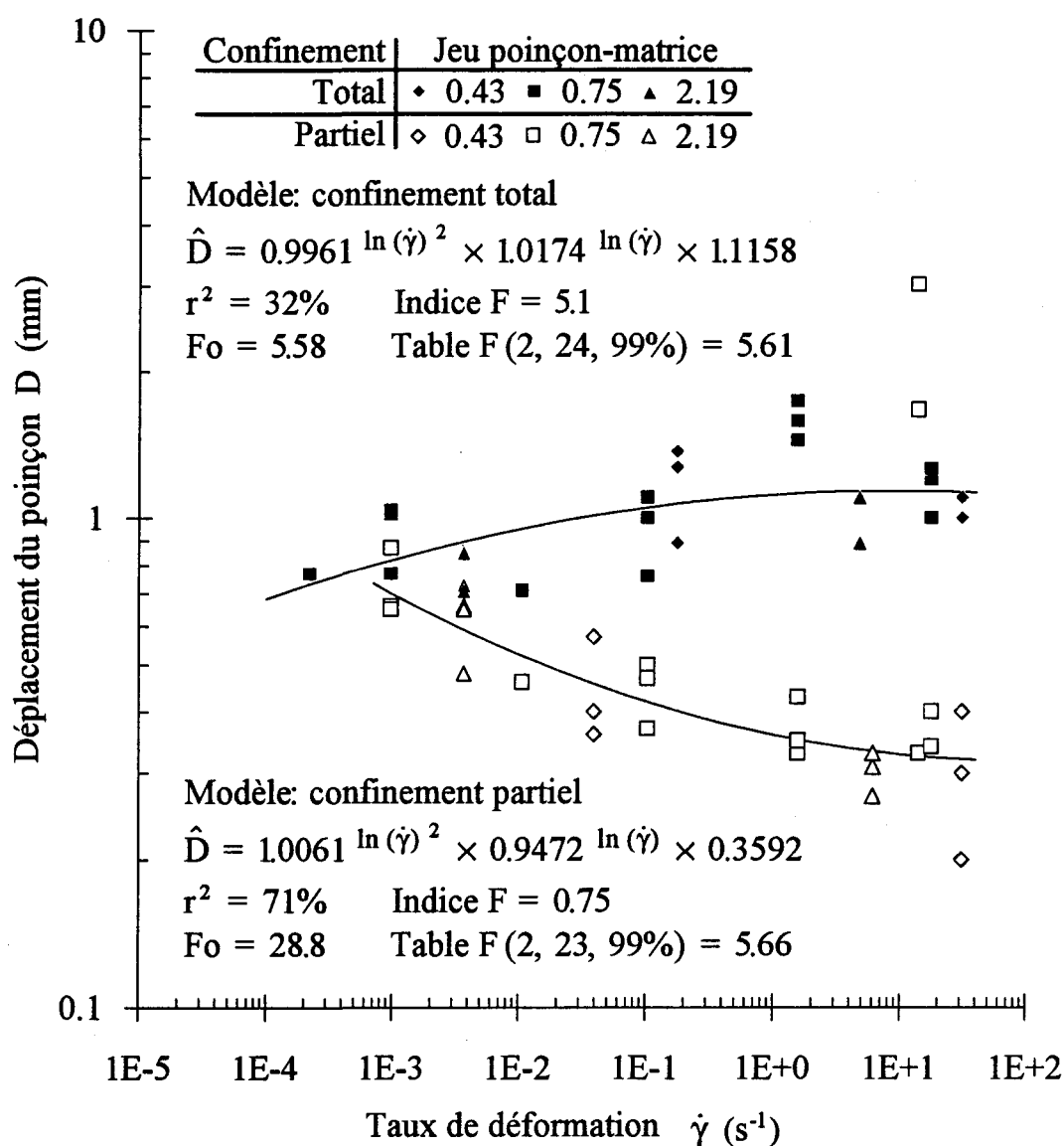


**Figure A II.33:** Module de cisaillement de la glace en fonction du taux de déformation (valeurs inscrites au tableau A I.14).



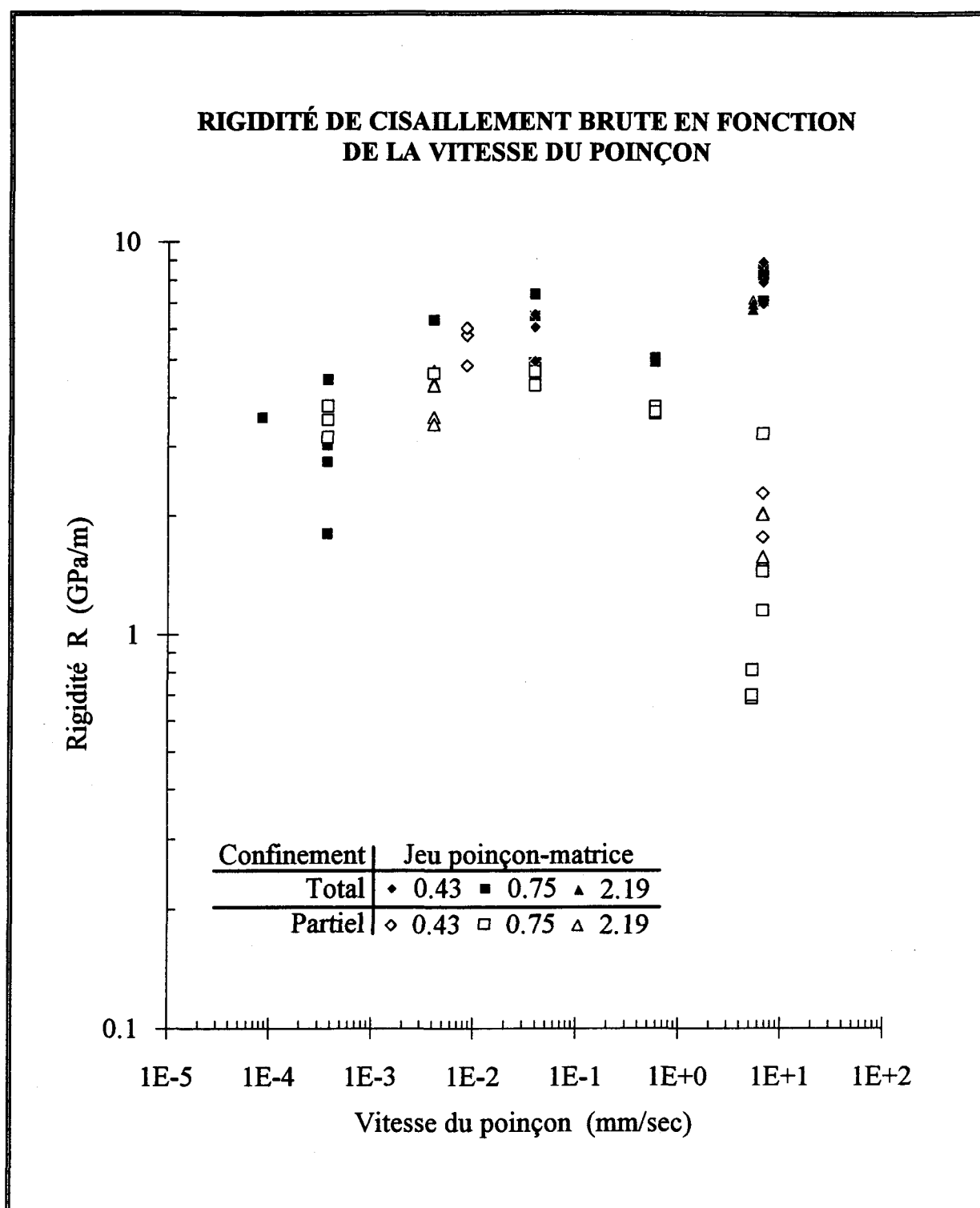
**Figure A II.34:** Rigidité de cisaillement brute de l'éprouvette en fonction du taux de déformation.

# **DISTANCE DE LA MONTÉE EN CHARGE EN FONCTION DU TAUX DE DÉFORMATION**

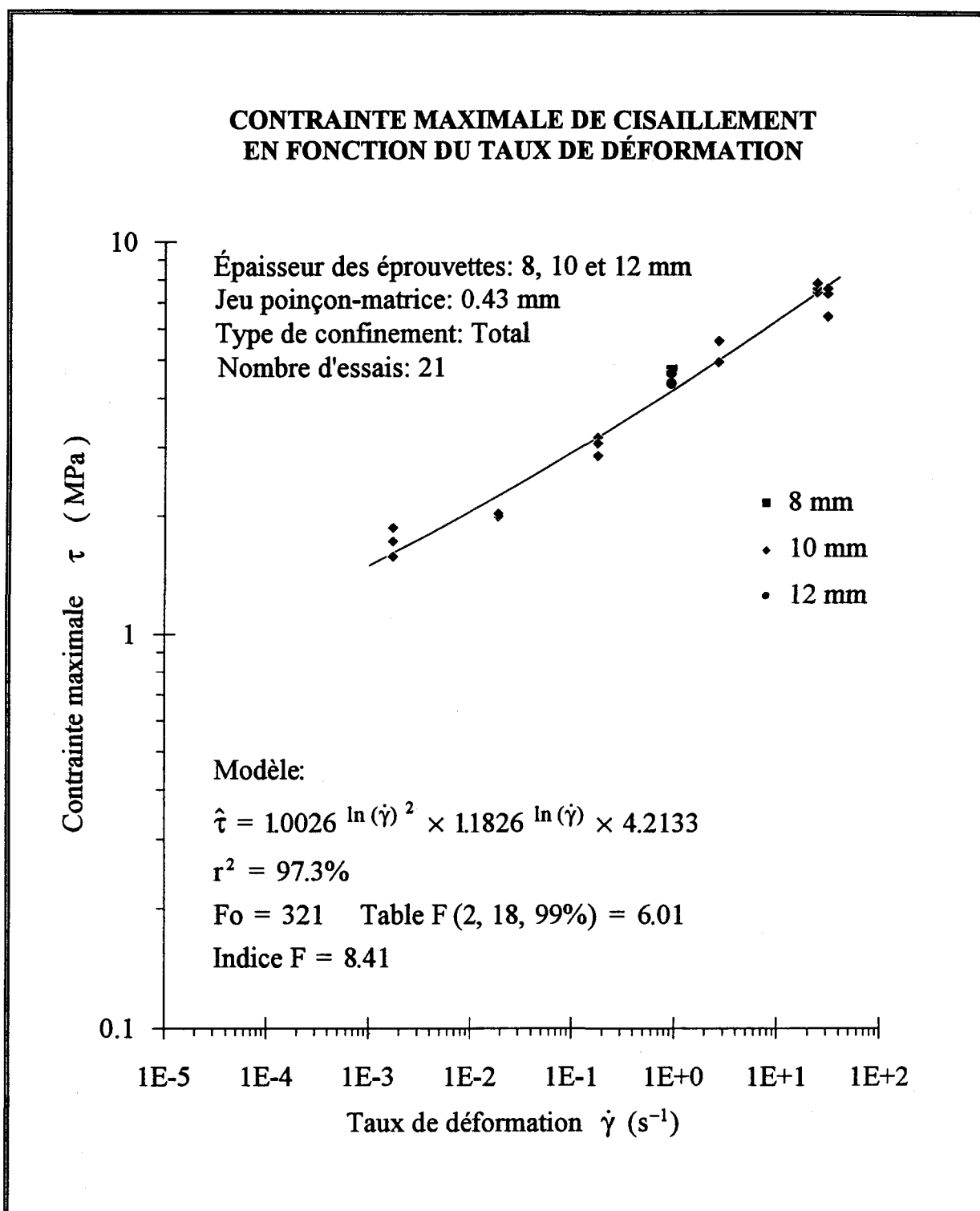


**Figure A II.35:** Déplacement total du poinçon pour toute la montée en charge en fonction du taux de déformation.

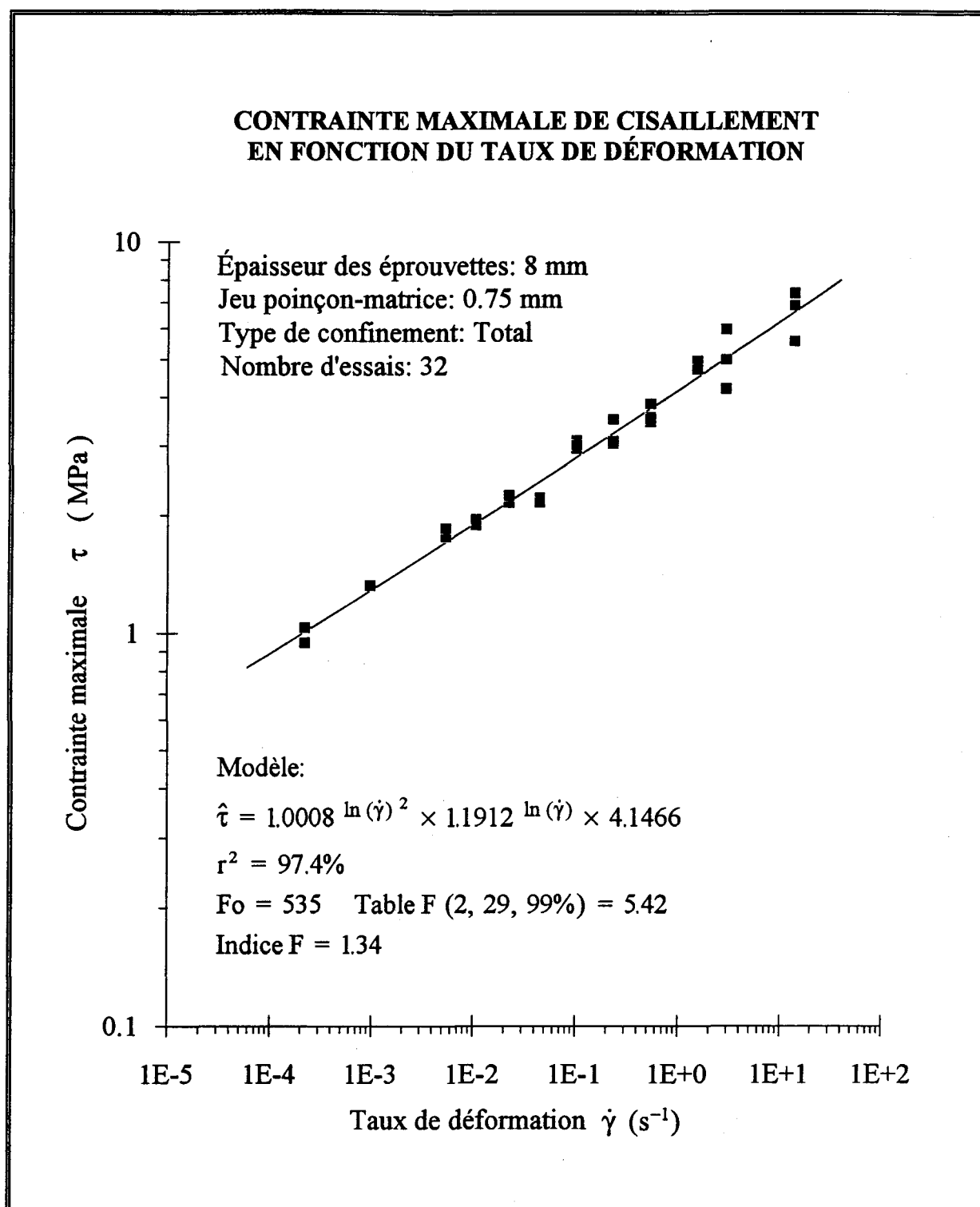




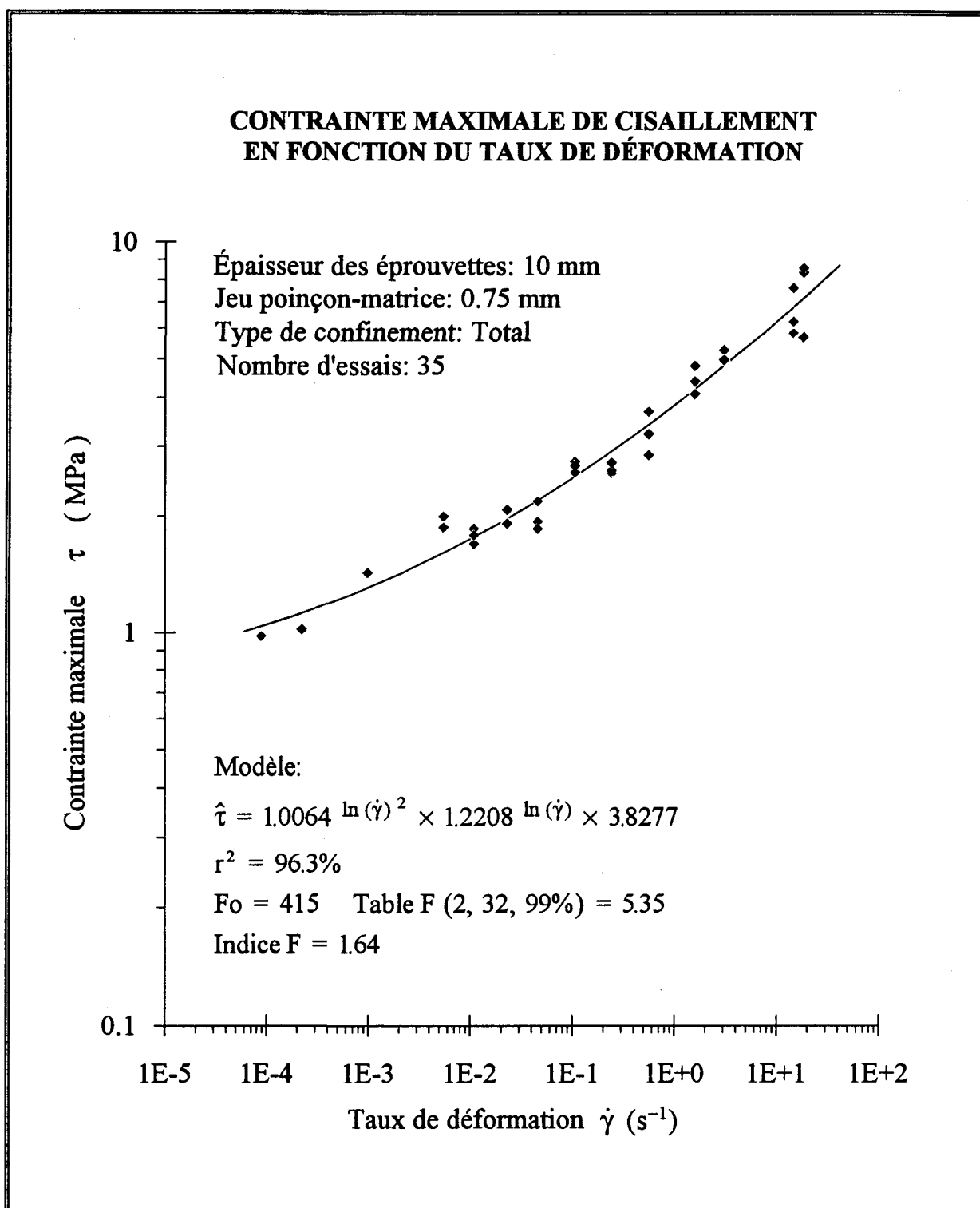
**Figure A II.36:** Rigidité de cisaillement brute de l'éprouvette en fonction de la vitesse de déplacement du poinçon.



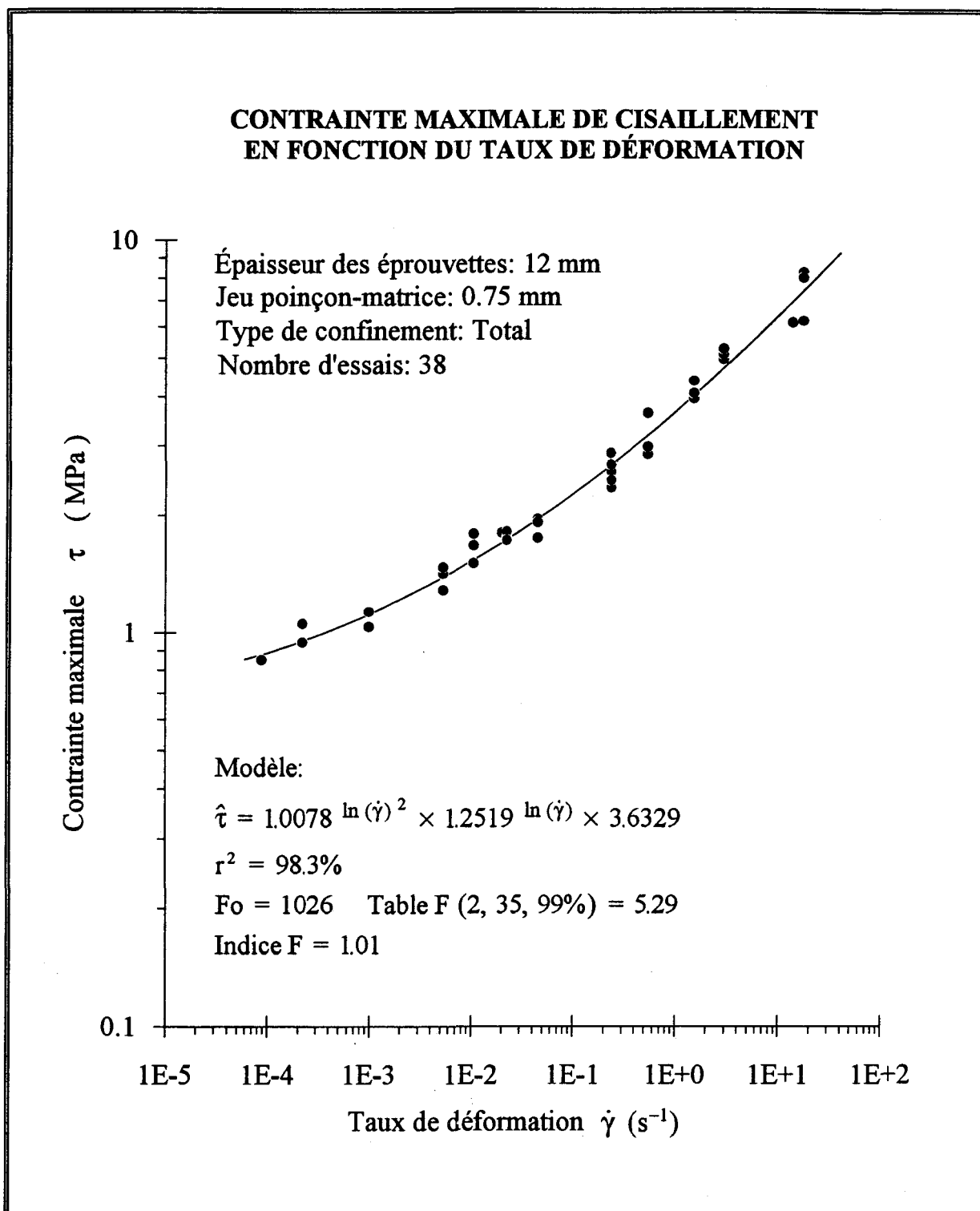
**Figure A II.37:** Contrainte maximale en fonction du taux de déformation: confinement total, jeu de 0,43 mm, éprouvettes de 8, 10 et 12 mm.



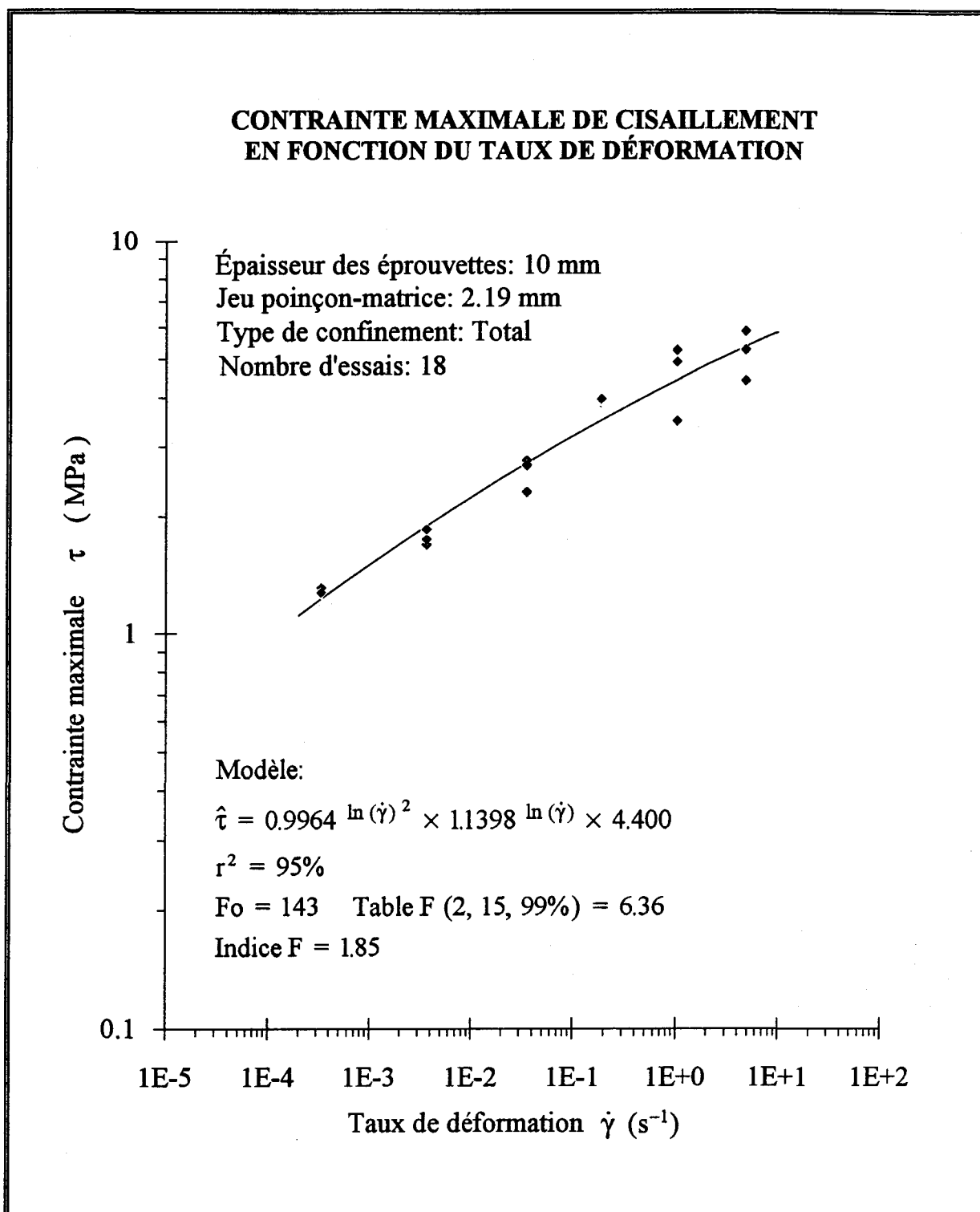
**Figure A II.38:** Contrainte maximale en fonction du taux de déformation: confinement total, jeu de 0,75 mm, éprouvettes de 8 mm.



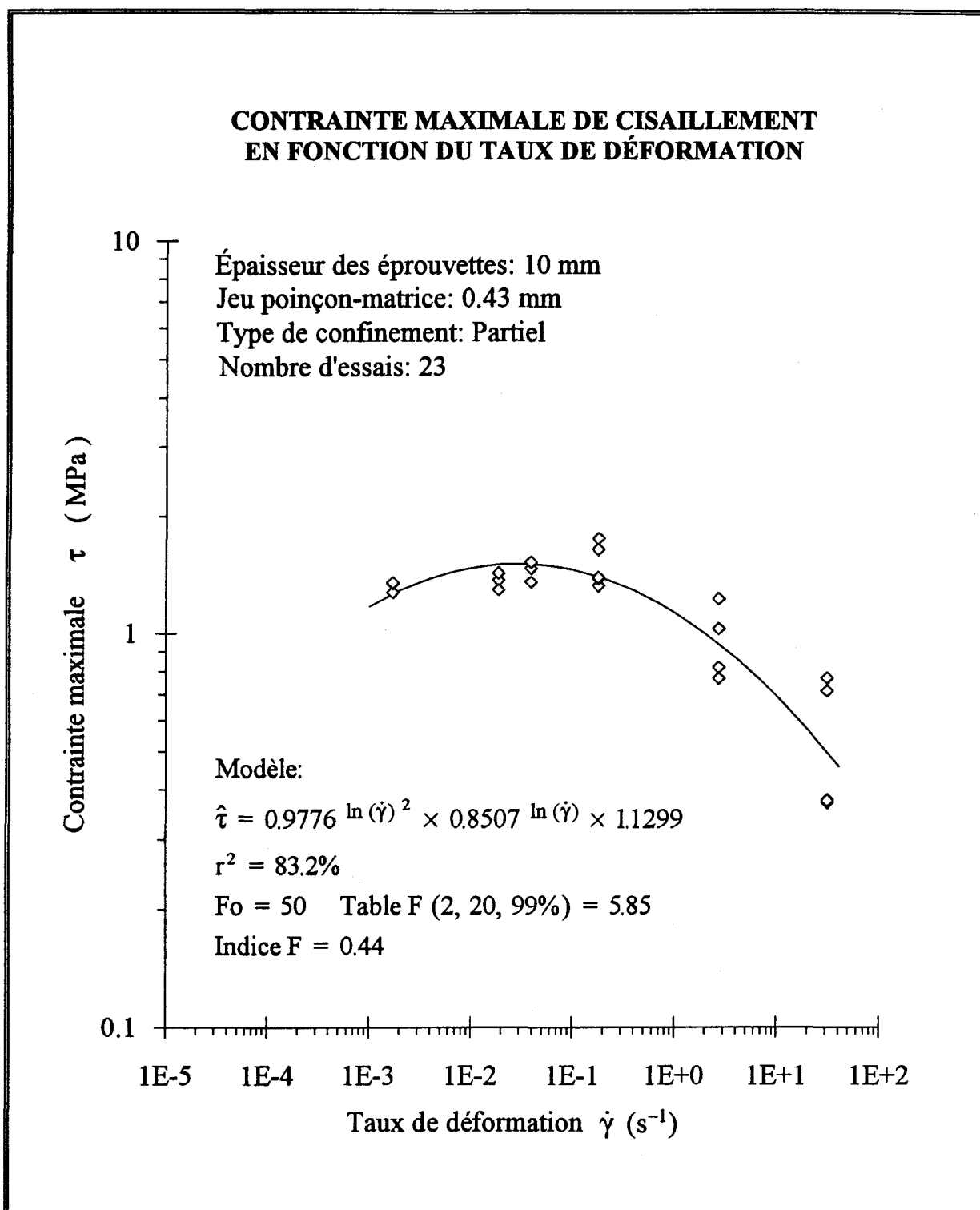
**Figure A II.39:** Contrainte maximale en fonction du taux de déformation: confinement total, jeu de 0,75 mm, éprouvettes de 10 mm.



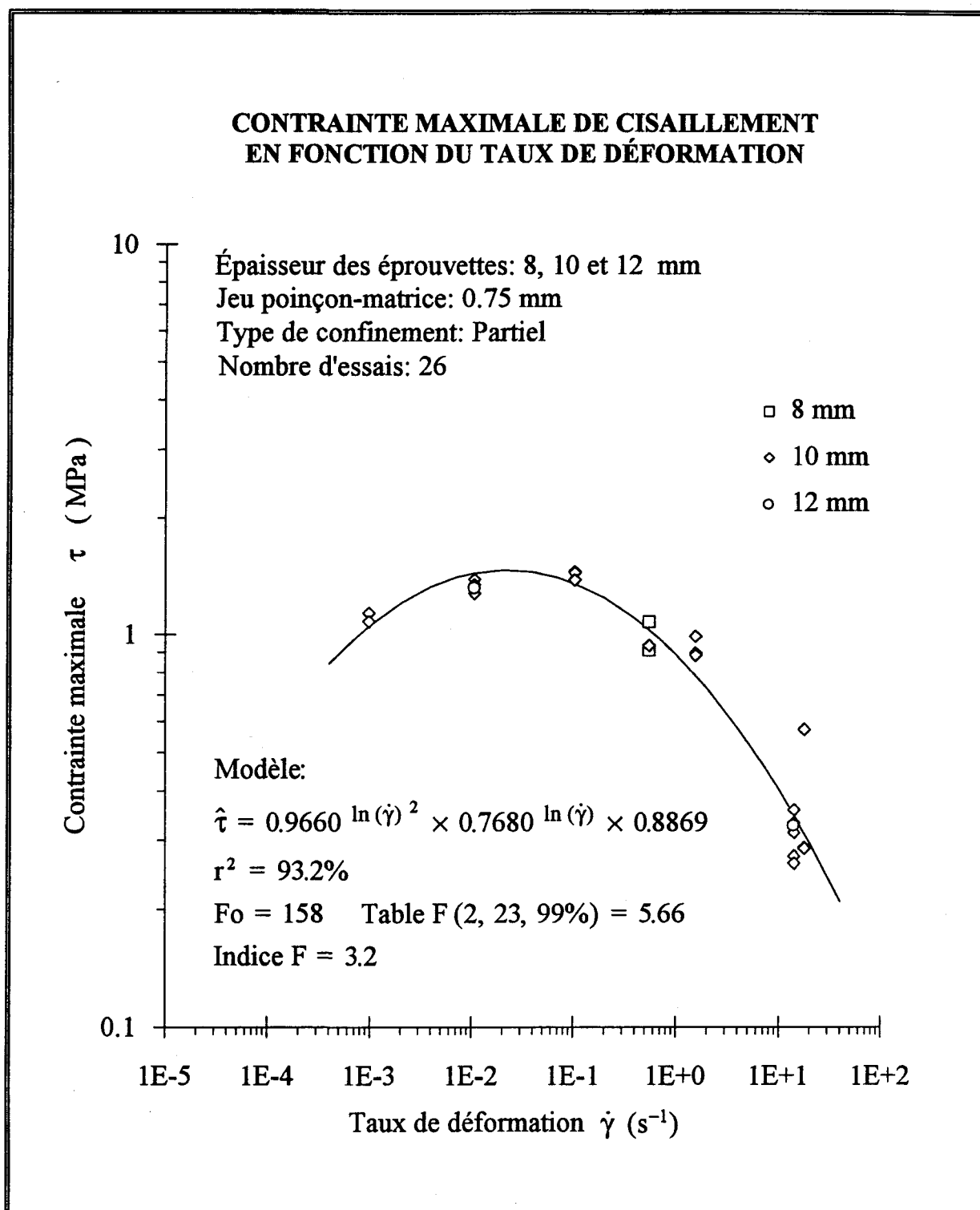
**Figure A II.40:** Contrainte maximale en fonction du taux de déformation: confinement total, jeu de 0,75 mm, éprouvettes de 12 mm.



**Figure A II.41:** Contrainte maximale en fonction du taux de déformation: confinement total, jeu de 2,19 mm, éprouvettes de 10 mm.

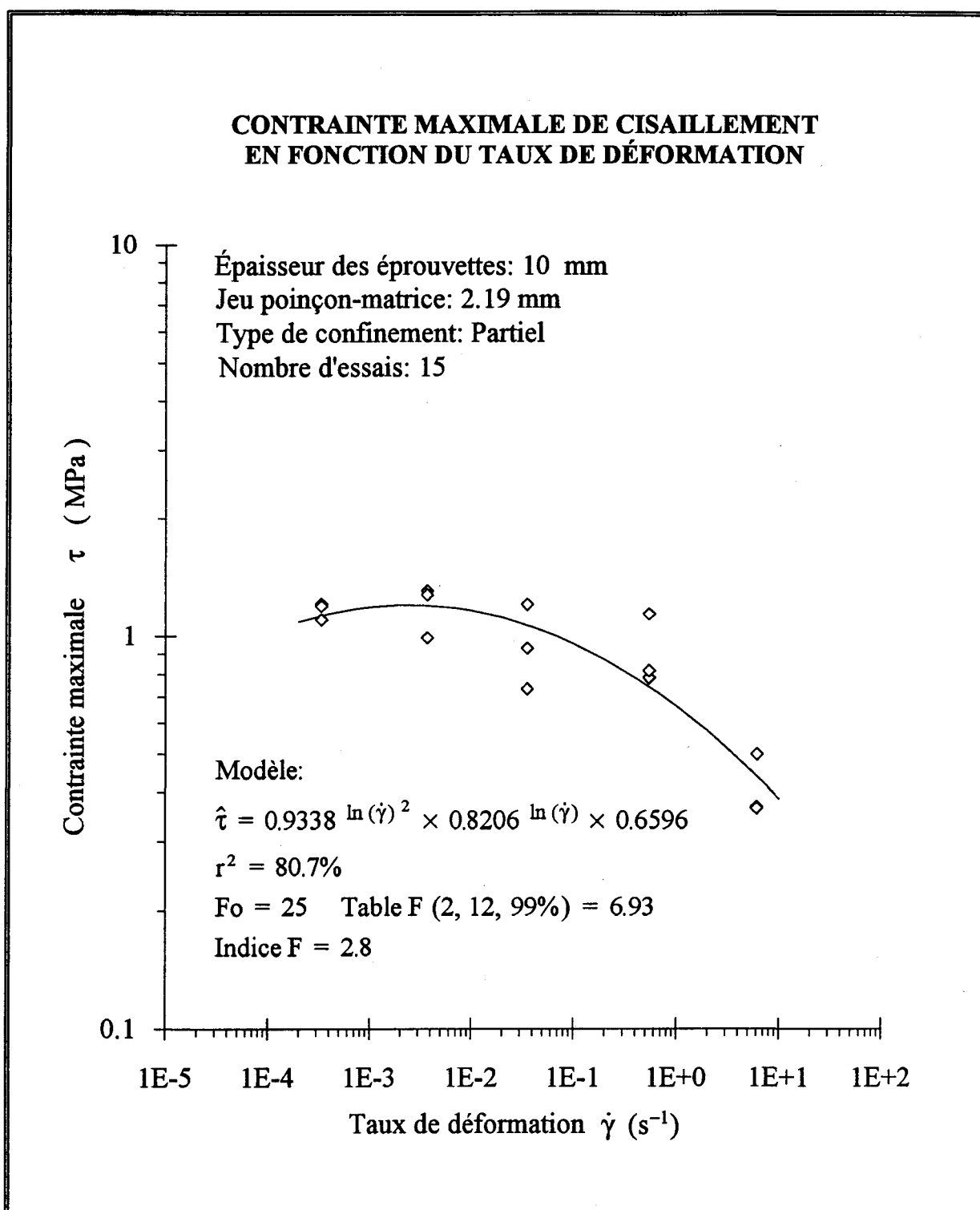


**Figure A II.42:** Contrainte maximale en fonction du taux de déformation: confinement partiel, jeu de 0,43 mm, éprouvettes de 10 mm.

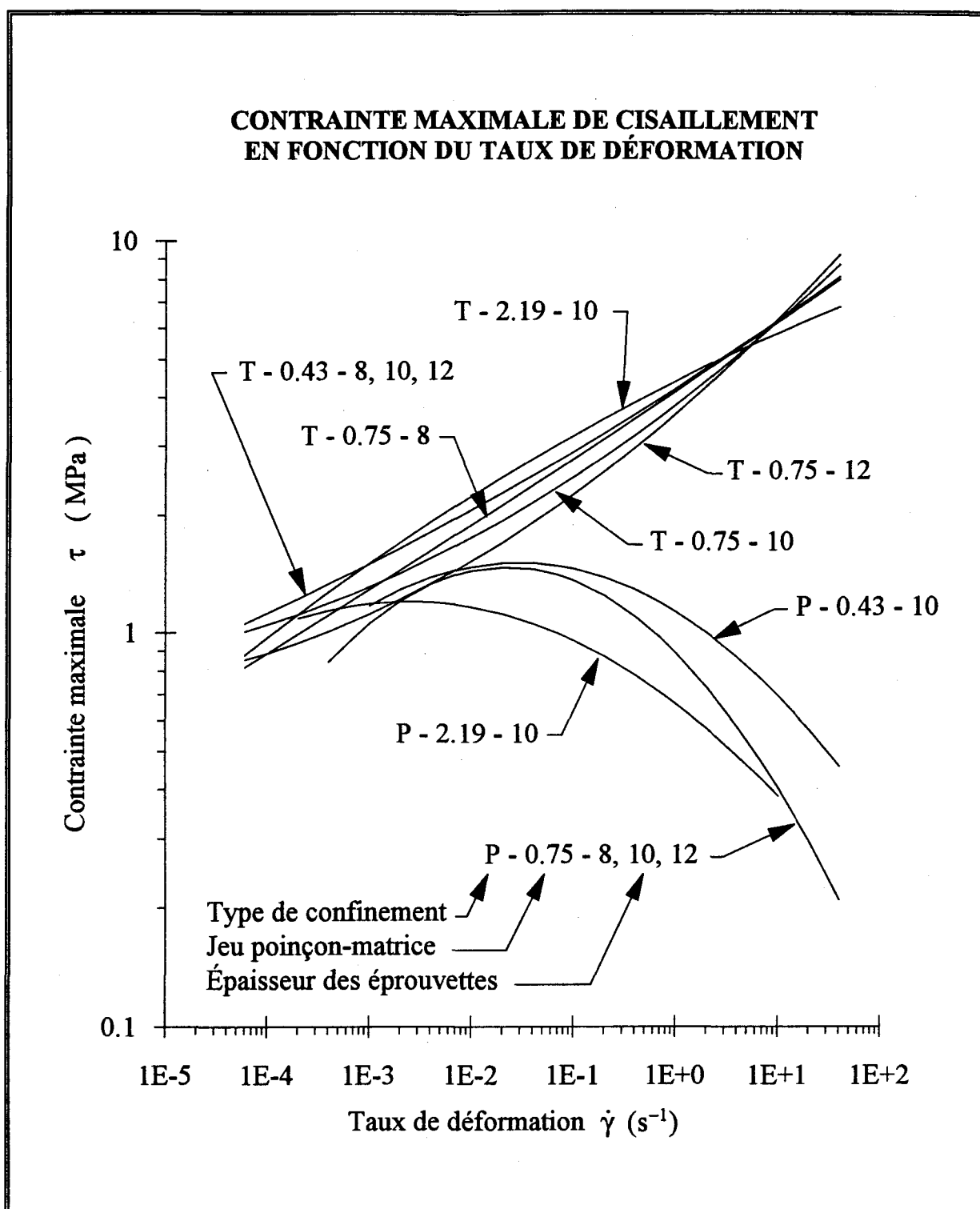


**Figure A II.43:** Contrainte maximale en fonction du taux de déformation: confinement partiel, jeu de 0,75 mm, éprouvettes de 8, 10 et 12 mm.

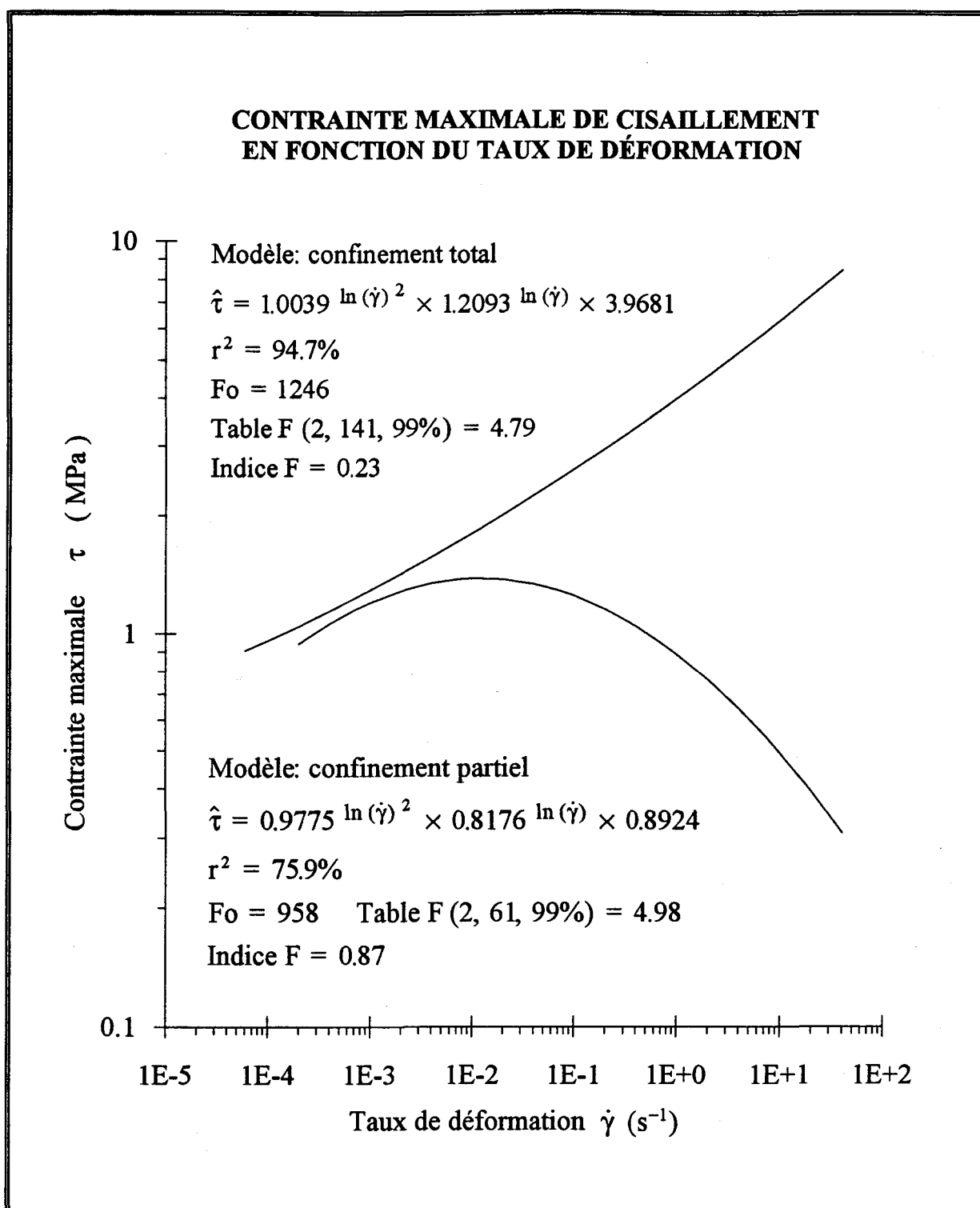




**Figure A II.44:** Contrainte maximale en fonction du taux de déformation: confinement partiel, jeu de 2,19 mm, éprouvettes de 10 mm.



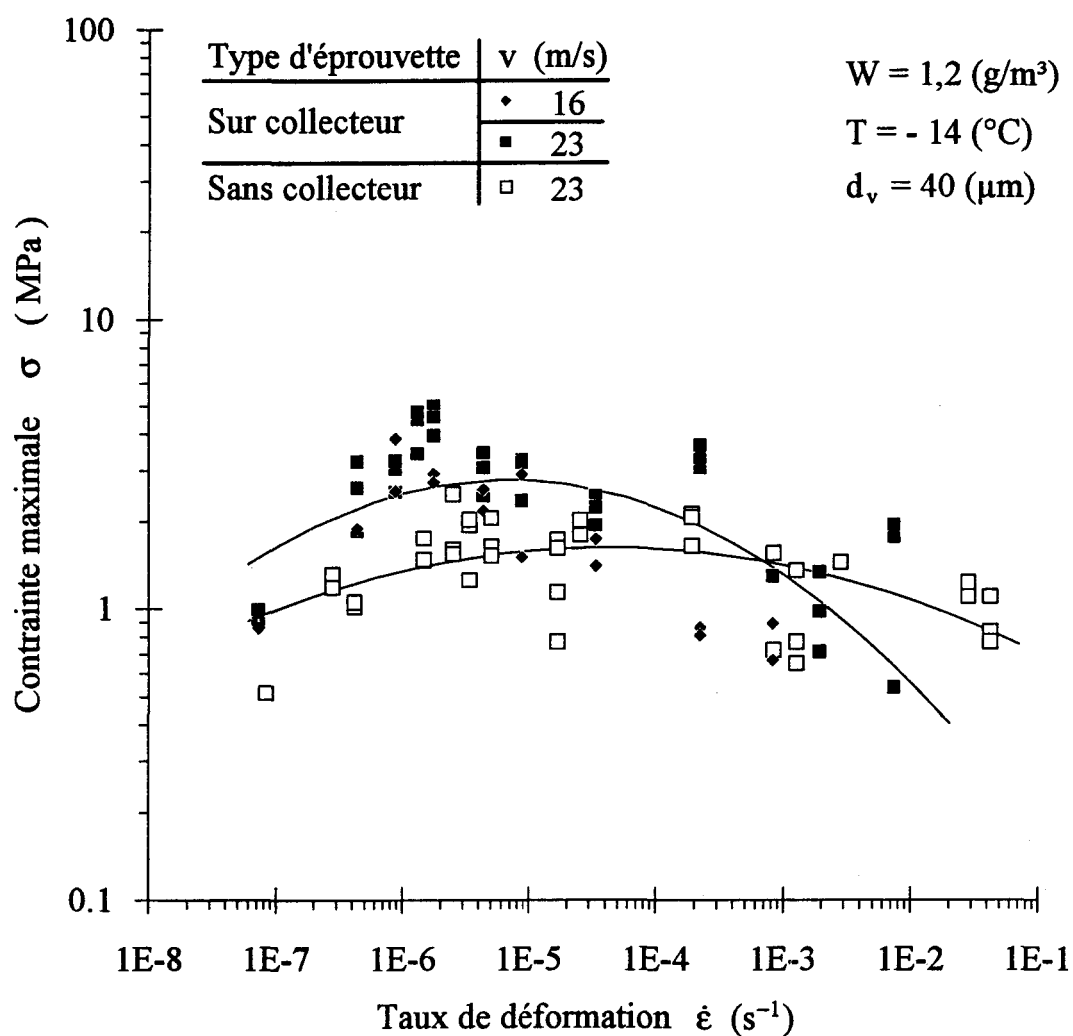
**Figure A II.45:** Superposition des modèles de la contrainte maximale en fonction du taux de déformation.



**Figure A II.46:** Modèle général de la contrainte maximale en fonction du taux de déformation pour les confinements total et partiel.

# **COURBES DES CONTRAINTES MAXIMALES EN FONCTION DU TAUX DE DÉFORMATION**

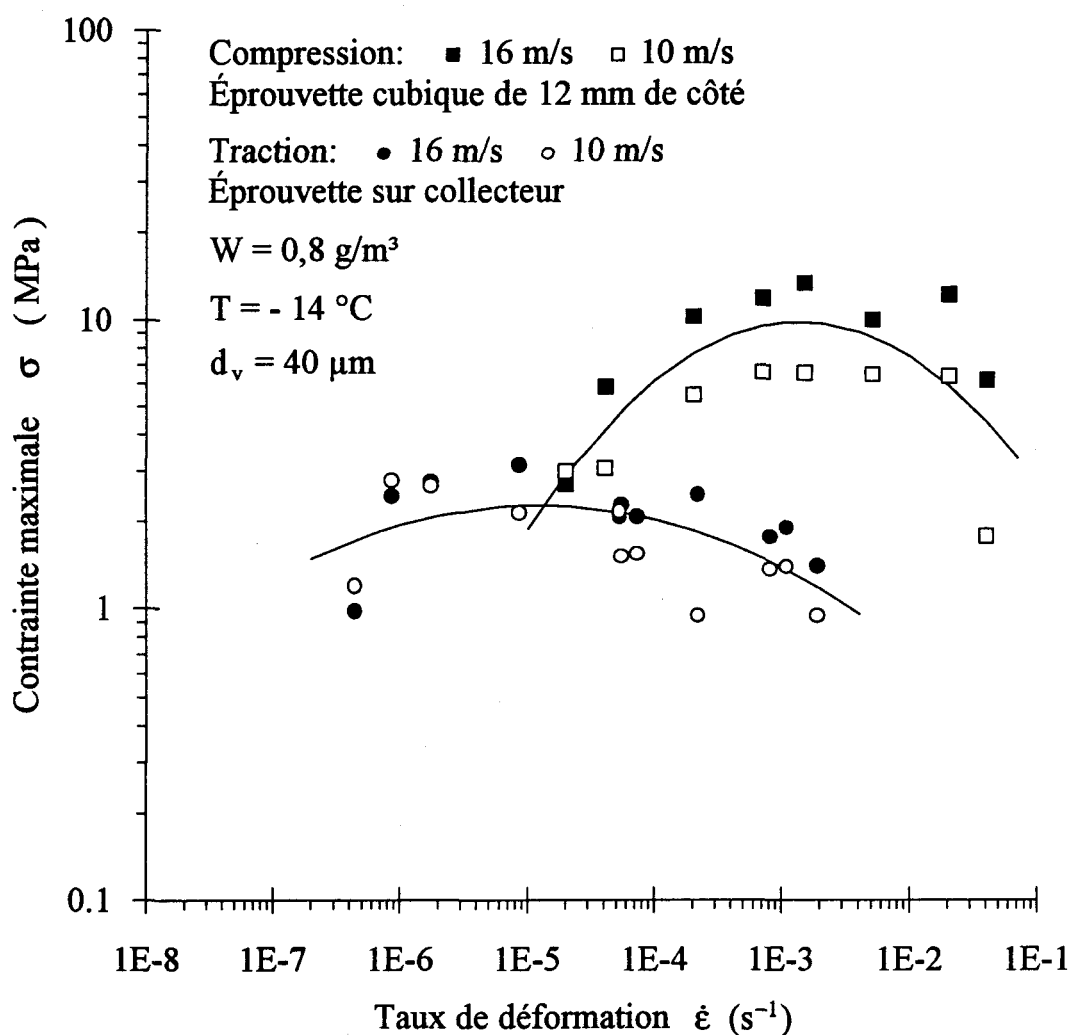
## **ESSAIS DE TRACTION Étude de Tremblay (1991)**



**Figure A II.47:** Contraintes maximales en fonction du taux de déformation de quelques essais en traction effectués par Tremblay (1991).

# **COURBES DES CONTRAINTES MAXIMALES EN FONCTION DU TAUX DE DÉFORMATION**

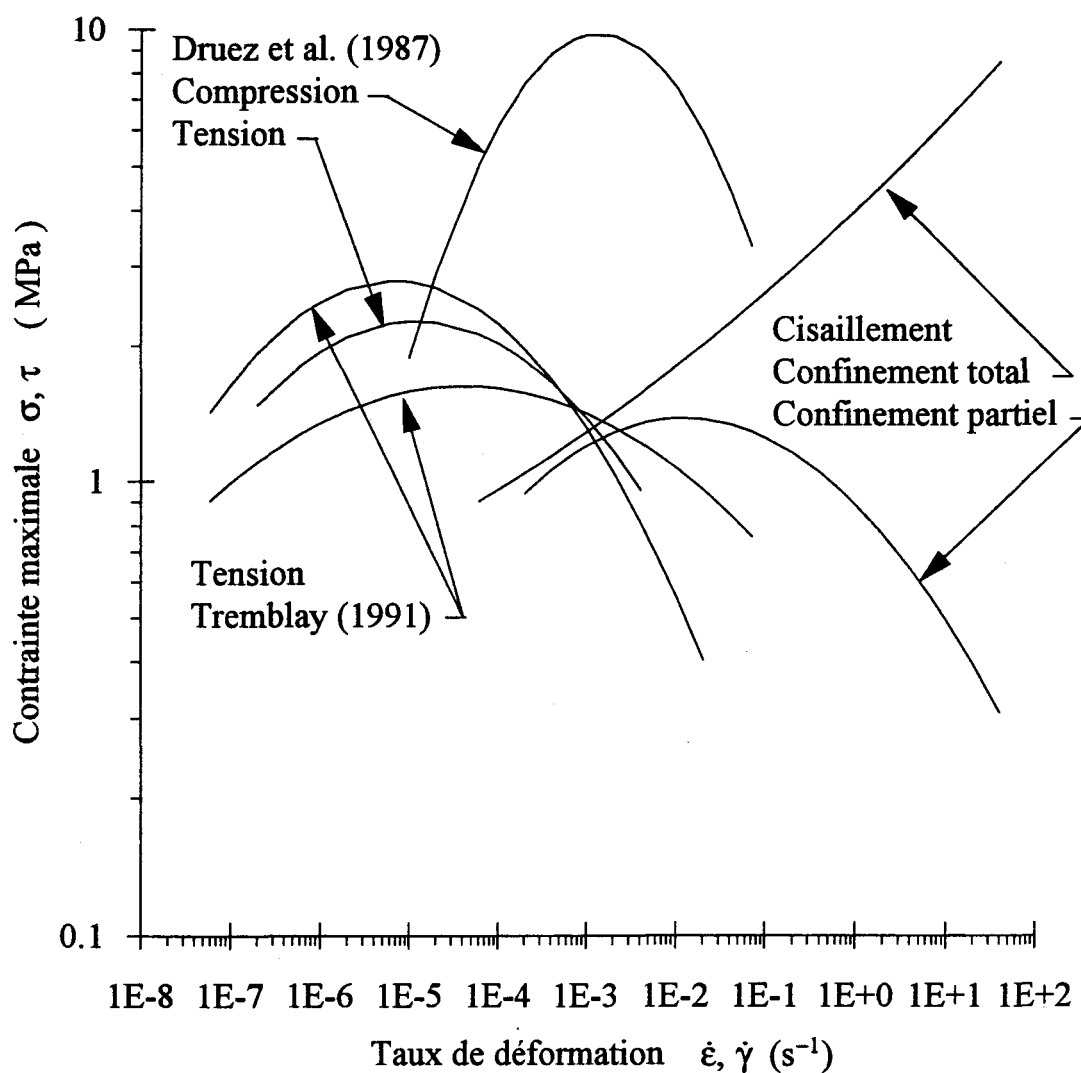
## **ESSAIS DE TRACTION ET DE COMPRESSION** Étude de Druez et al. (1987)



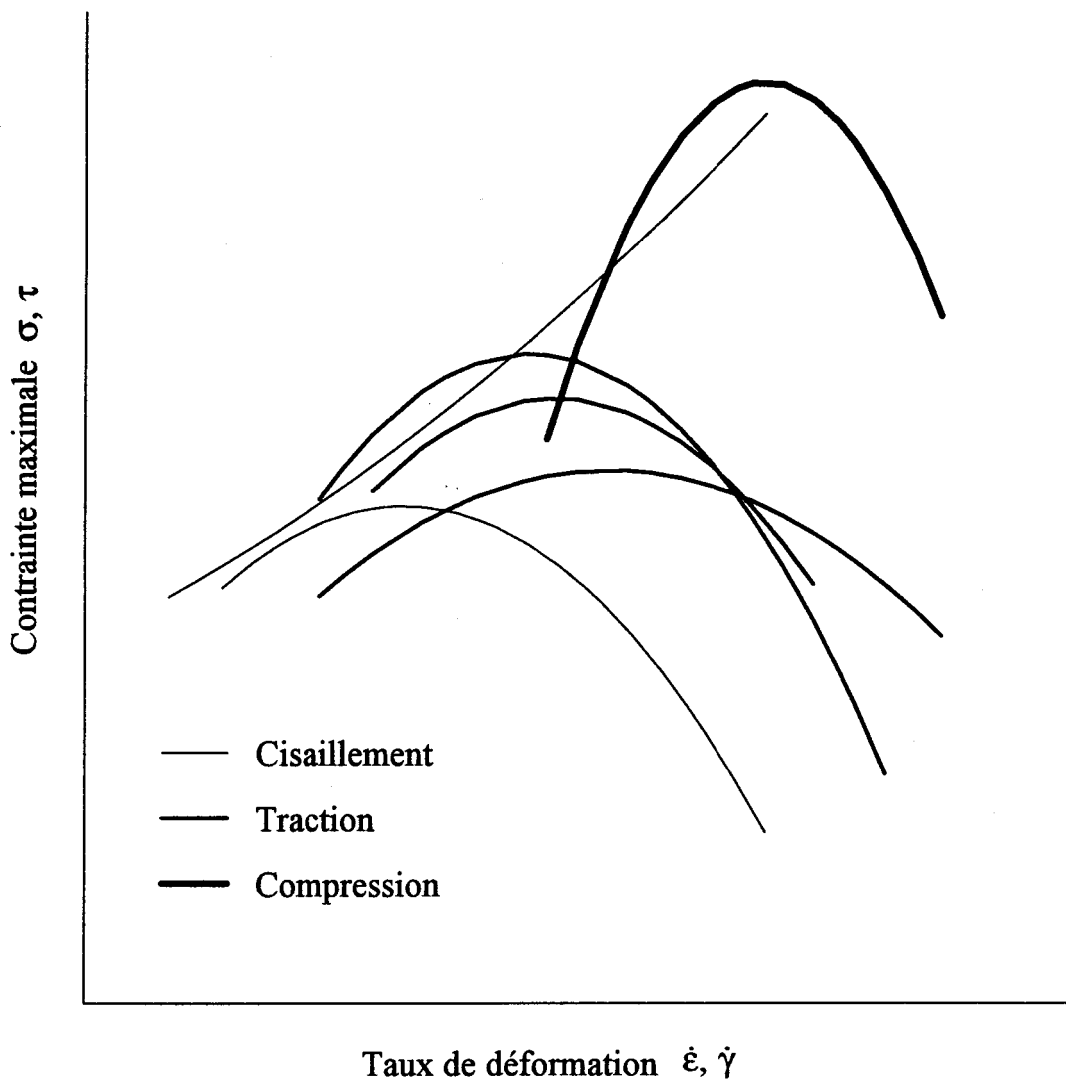
**Figure A II.48:** Contraintes maximales en fonction du taux de déformation de quelques essais en traction et en compression effectués par Druez et al. (1987)

# **COURBES DES CONTRAINTES MAXIMALES DE TRACTION, DE COMPRESSION ET DE CISAILLEMENT**

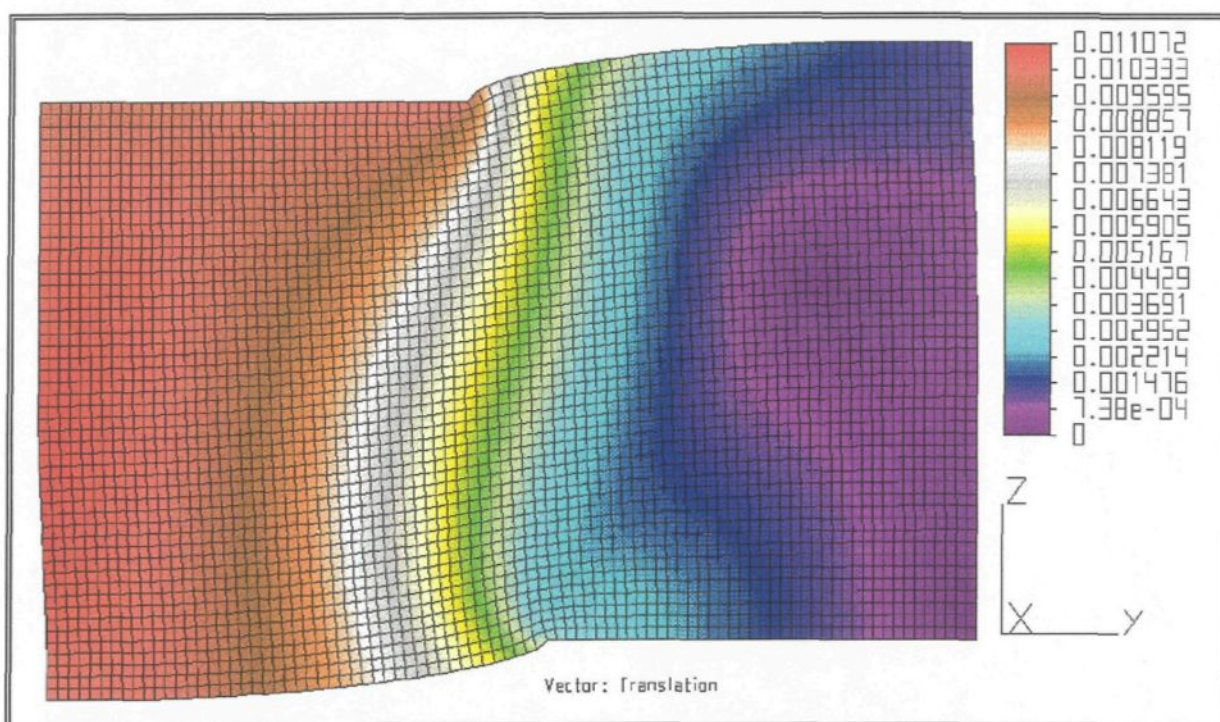
**Superposition des courbes**



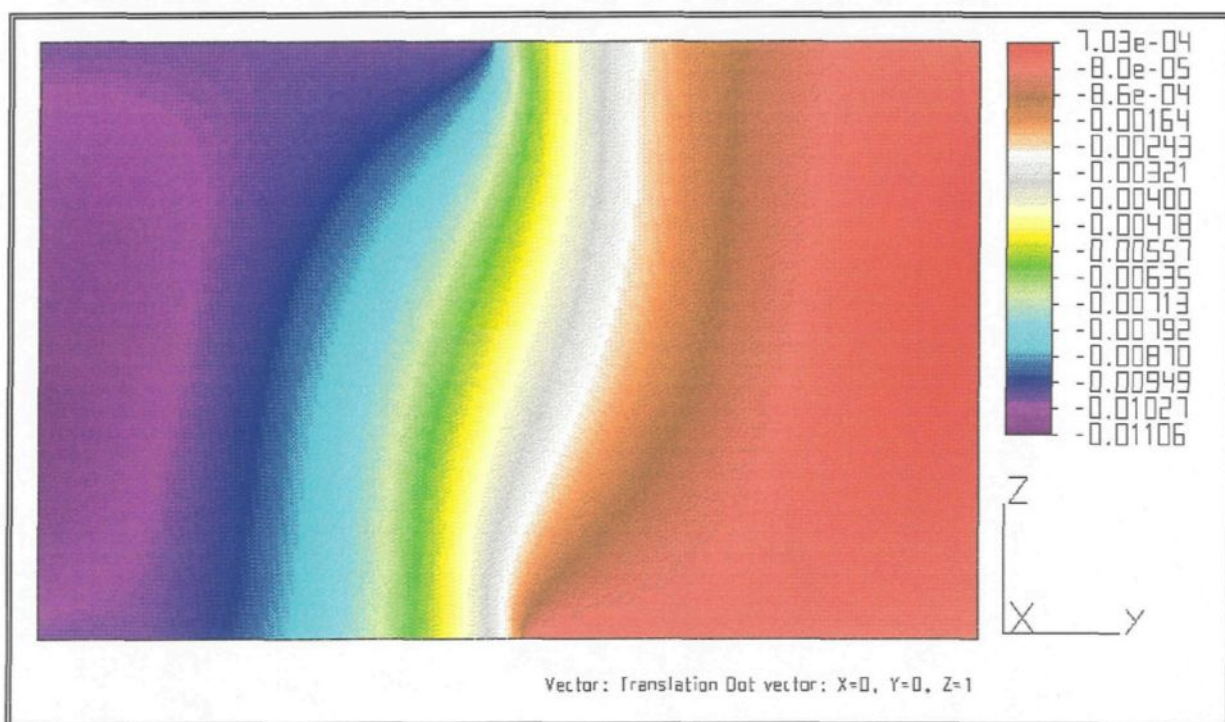
**Figure A II.49:** Superposition des courbes des contraintes maximales en fonction du taux de déformation pour les essais de traction, de compression et de cisaillement.

**COURBES DES CONTRAINTES MAXIMALES DE  
TRACTION, DE COMPRESSION ET DE CISAILLEMENT****Superposition des courbes**

**Figure A II.50:** Superposition des courbes des contraintes maximales pour les essais de traction, de compression et de cisaillement.

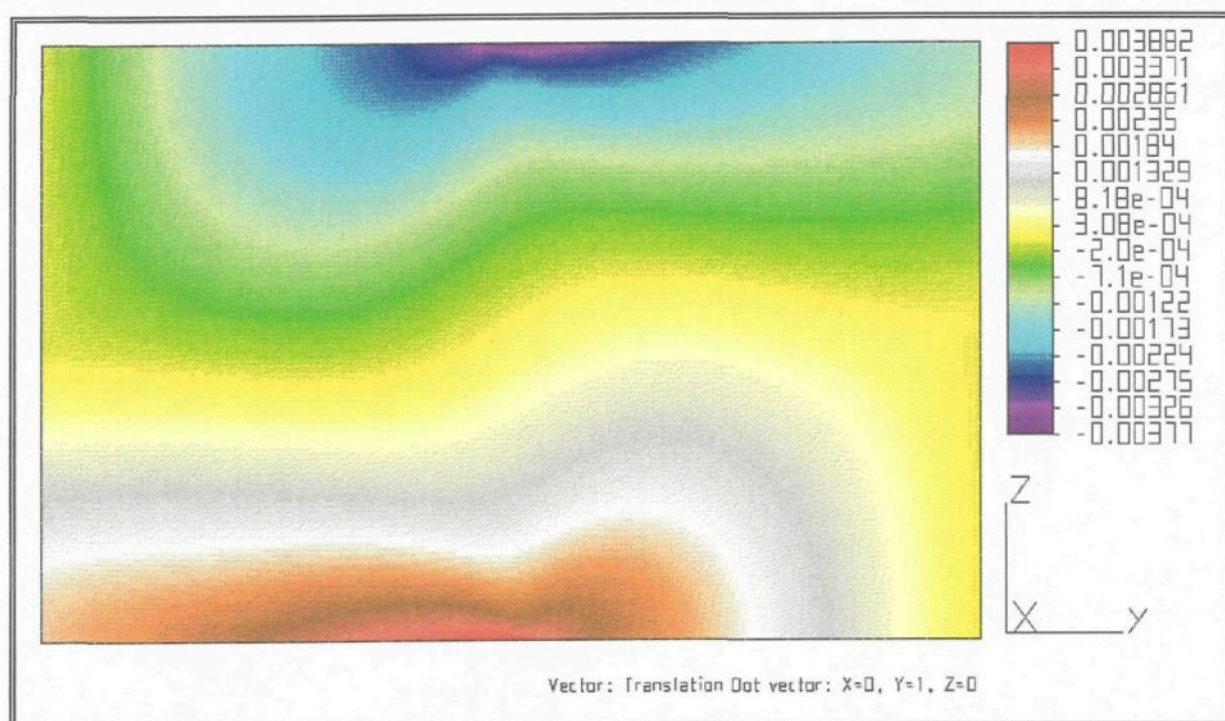


**Figure A II.51:** Résultante vectorielle de la déformation de la section de l'éprouvette (amplification du déplacement 500X).

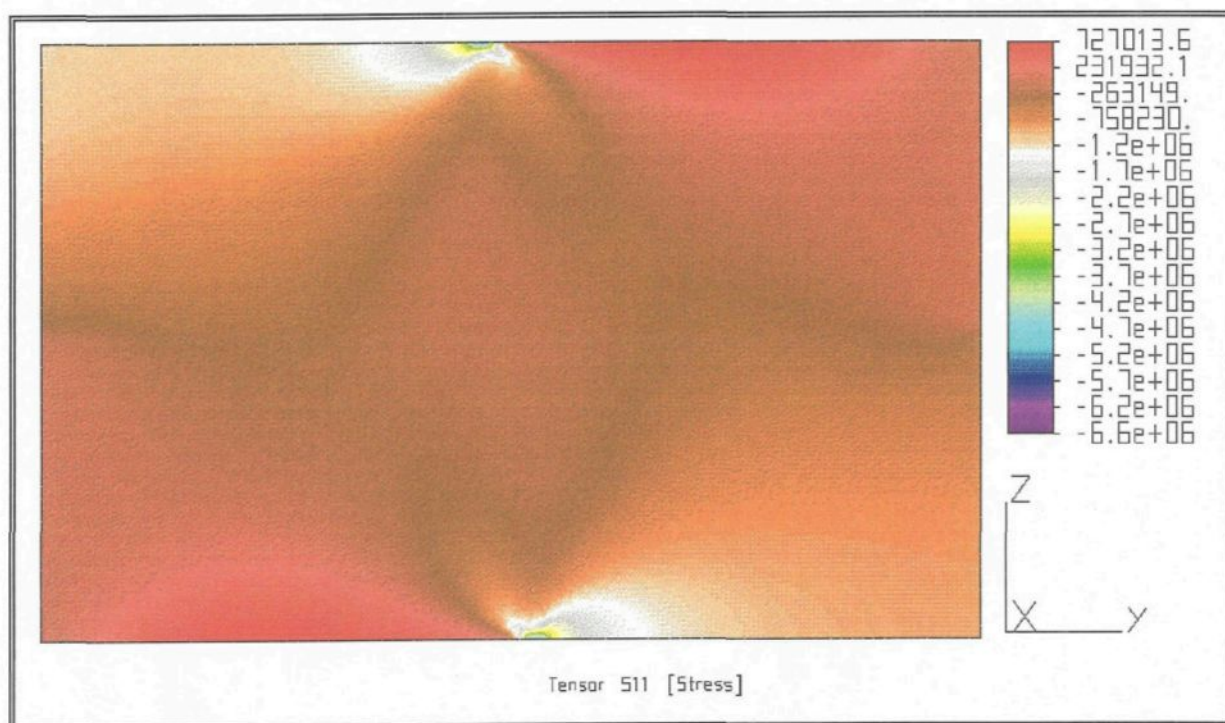


**Figure A II.52:** Déformation de la section de l'éprouvette dans la direction de l'axe z.



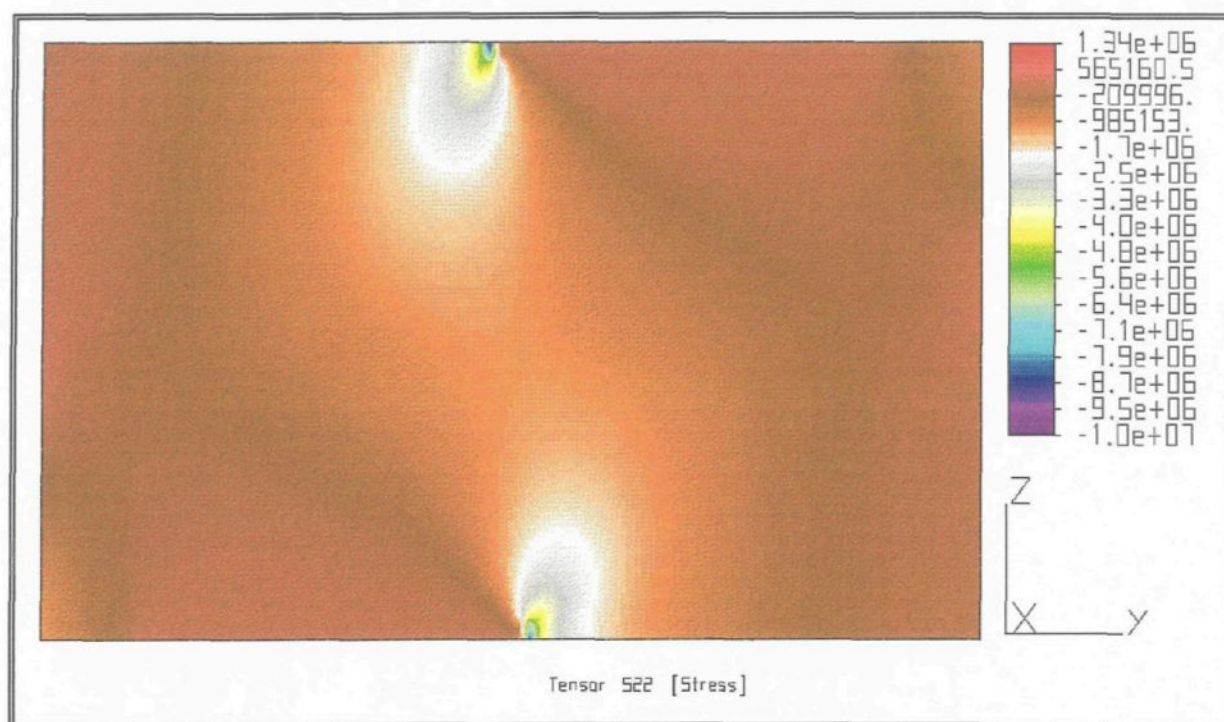


**Figure A II.53:** Déformation de la section de l'éprouvette dans la direction de l'axe y.

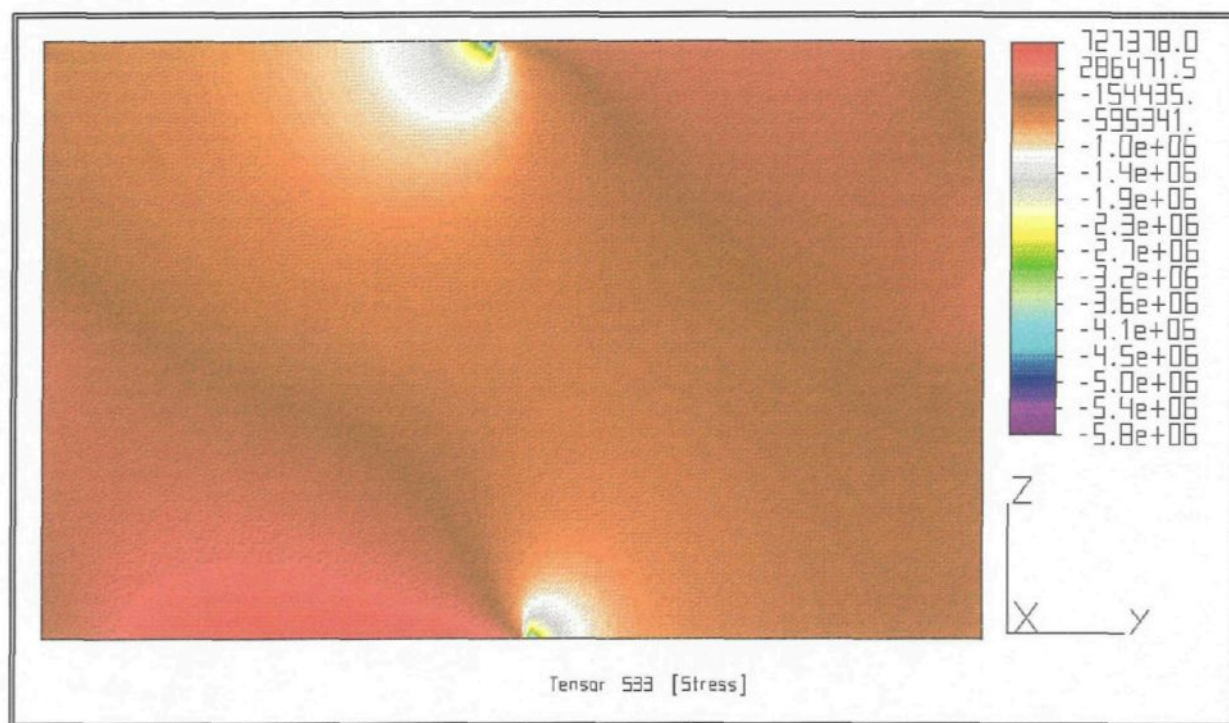


**Figure A II.54:** Valeurs des contraintes normales dans la direction de l'axe y de la section de l'éprouvette.



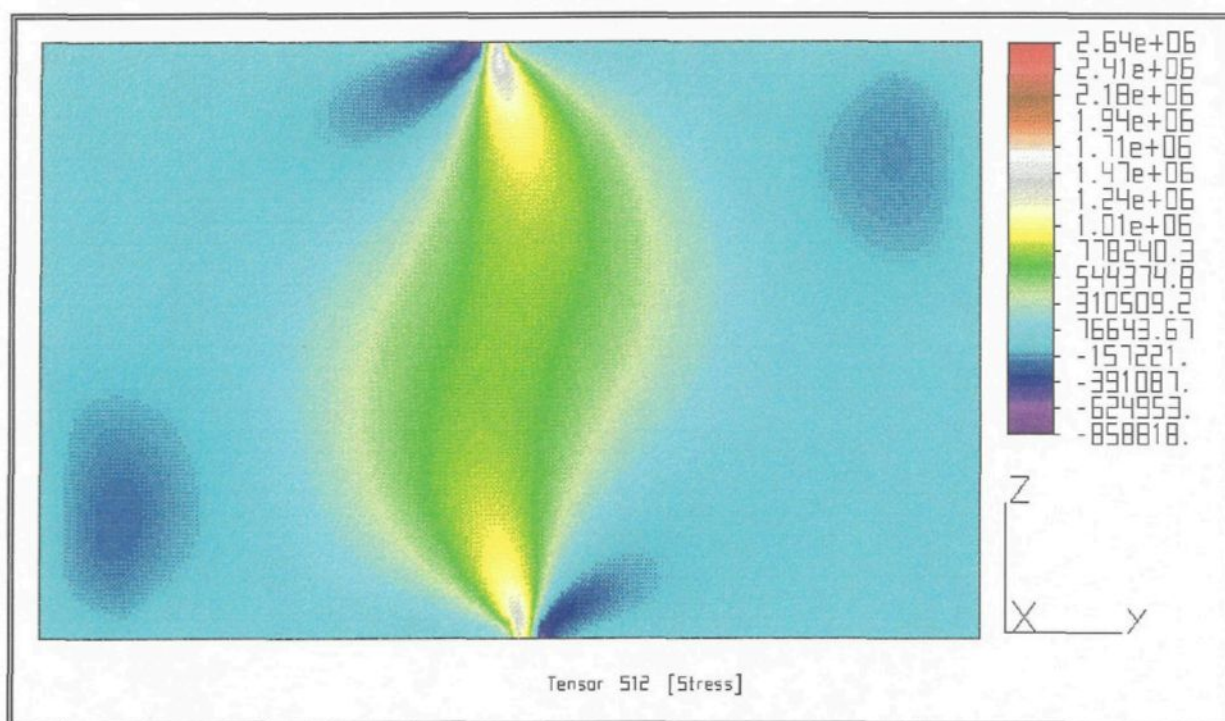


**Figure A II.55:** Valeurs des contraintes normales dans la direction de l'axe z de la section de l'éprouvette.

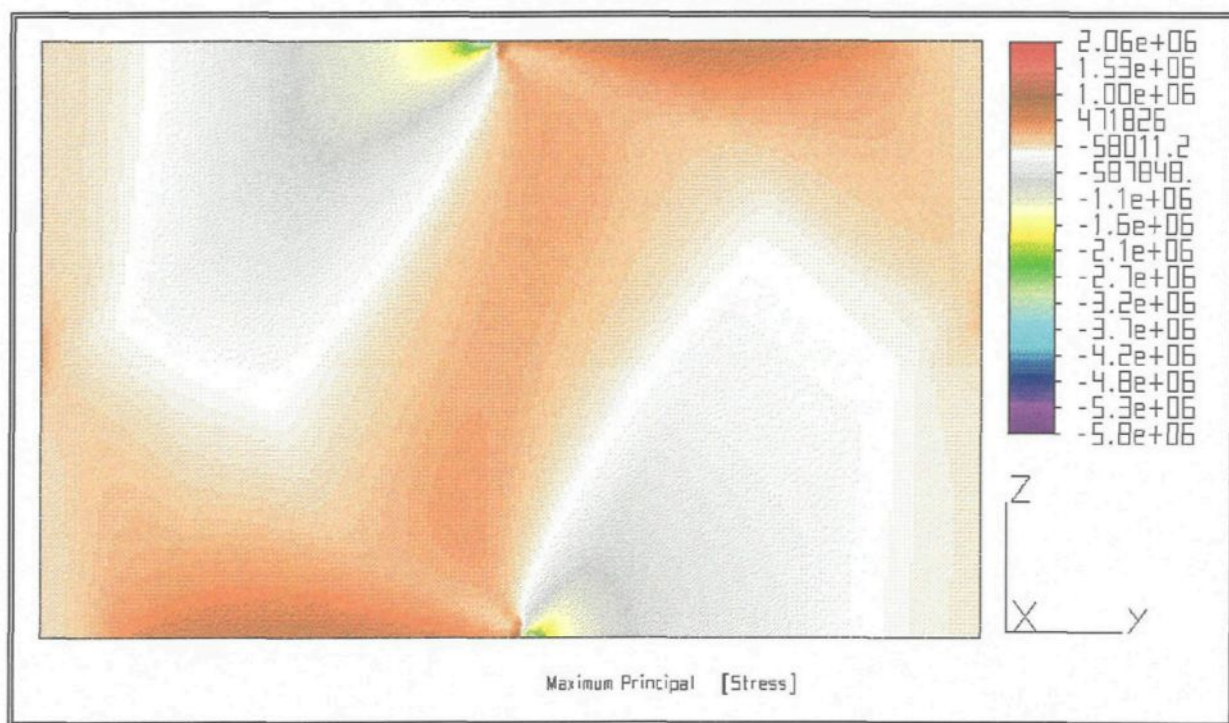


**Figure A II.56:** Valeurs des contraintes normales dans la direction de l'axe x de la section de l'éprouvette.

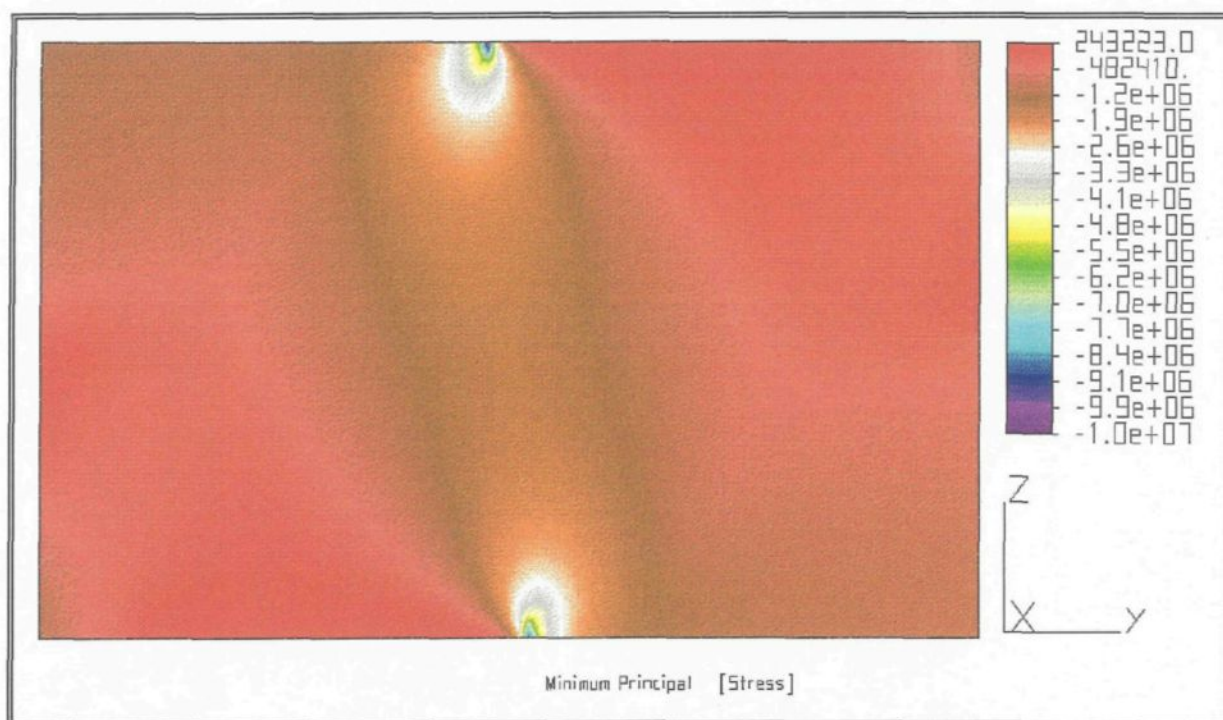




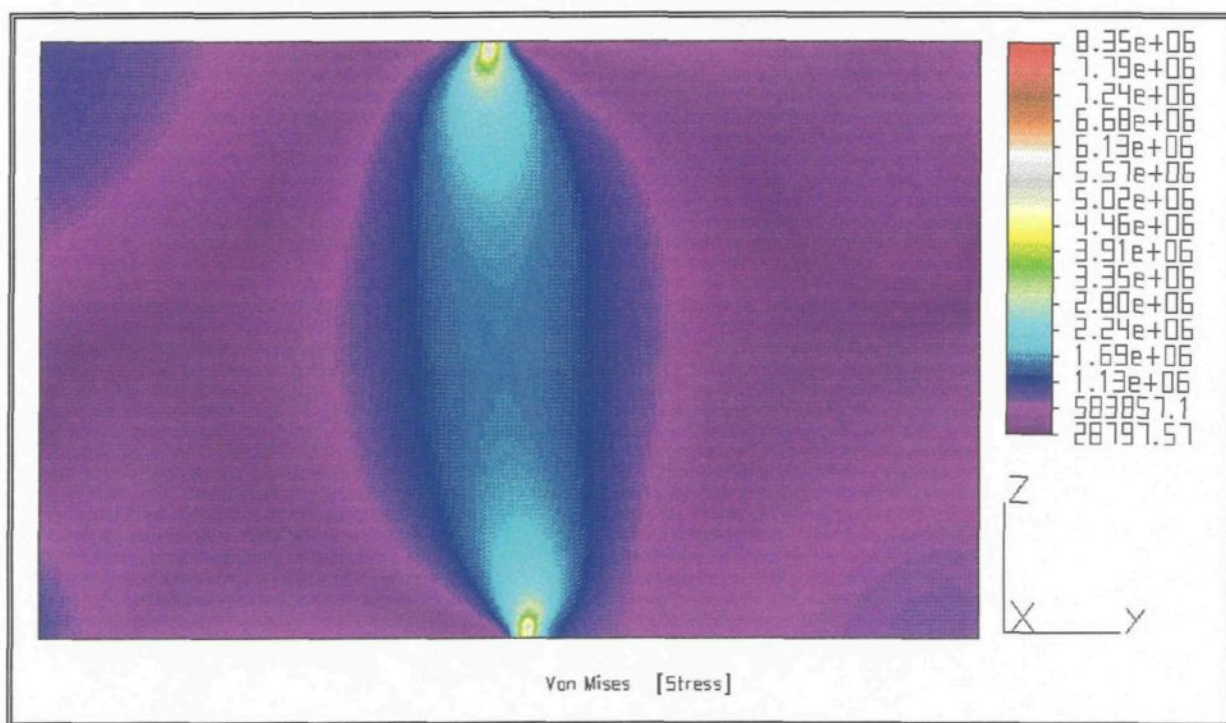
**Figure A II.57:** Valeurs des contraintes de cisaillement dans le plan yz dans la section de l'éprouvette.



**Figure A II.58:** Valeurs maximums des contraintes principales dans la section de l'éprouvette.



**Figure A II.59:** Valeurs minimums des contraintes principales dans la section de l'éprouvette.



**Figure A II.60:** Valeurs des contraintes de von Mises dans la section de l'éprouvette.

### **ANNEXE III**



```

C-----
C  NOM DU PROGRAMME:    ACQUISI.FOR
C  GÉNÉRALITÉ: Ce programme a été adapté et élaboré à partir d'un
C                  programme conçu par Marco Boudreault, assistant
C                  de recherche pour l'Équipe de Recherche en
C                  Ingénierie du Givrage des Structures (ÉRIGS).
C  UTILITÉS:  Acquisition des pressions d'air et d'eau ainsi que
C                  de la vitesse de l'air.
C                  Le programme contrôle la vitesse de la soufflerie
C                  autour d'une vitesse cible.
C                  Les données sont envoyées dans le fichier
C                  ACQUISI.DAT.
C                  Les tildes (~) sont utilisés lors de l'ouverture
C                  du fichier d'acquisition par le logiciel EXCEL.
C-----
C  Déclaration des variables
C  -----
C  INTEGER*2      ADAPT, DEVICE, CTRL, STAT, CHANL0, CHANL1,
C                  CHANL2, CHANL3, RAWVA0, RAWVA1, RAWVA2,
C                  RAWVA3, ILINE, TIME
C  REAL           Vo, MOYENNE, AJUST, VISEE, VITMOY, VITESS
C  CHARACTER*25   DATE, NO, OK
C  CHARACTER      A, B, C, D
C
C  Fonctions utilisées
C  -----
C  FVITESSE(X)=0.9656*SQRT(VO-X)
C
C  Initialisation des variables
C  -----
C  A=27
C  B=91
C  C=50
C  D=74
C  ADAPT=1
C  DEVICE=9
C  CHANL0=0
C  CHANL1=1

```

```

CHANL2=2
CHANL3=3
CTRL=0
STAT=0
TIME=0.0
PRESAIR=0.0
PRESEAU=0.0
VITESSE=0.0
VO=0.0
ILINE=1
TOTVITMOY=0.0
COMPTEUR=0
AJUST=0

```

C

C

Ouverture du fichier

C

-----

```
OPEN(56,FILE='ACQUISI.DAT',STATUS='NEW')
```

C

C

Demande de la date, du numéro et de la valeur de référence (VO)

C

et écriture des informations à l'écran

C

-----

```
WRITE(*,*) A,B,C,D
```

```
WRITE(*,50)
```

```
READ (*,60) DATE
```

```
WRITE(*,*)
```

```
WRITE(*,45)
```

```
READ (*,60) NO
```

```
WRITE(*,*)
```

```
WRITE(*,55)
```

```
READ (*,*) VO
```

```
WRITE(*,*)
```

```
WRITE(*,56)
```

```
READ (*,*) VISEE
```

```
WRITE(*,*)
```

C

C

Initialisation des canaux de sorties (D/A) à zéro volt

C

-----

```
RAWVA0=2047
```

```
CALL AOUS(ADAPT,DEVICE,CHANL0,CTRL,RAWVA0,STAT)
```

```
RAWVA1=2047
```

```
CALL AOUS(ADAPT,DEVICE,CHANL1,CTRL,RAWVA1,STAT)
```

```

C
WRITE(*,57)
WRITE(*,58)
WRITE(*,*)
WRITE(*,59)
READ(*,60) OK
WRITE(*,*)
WRITE(*,40)
WRITE(*,*)
WRITE(*,70)
WRITE(*,*)

C
C   Écriture du numéro de l'essai, de la date, de la valeur de
C   référence(Vo) et de la vitesse dans le fichier ACQUI.SI.DAT
C   -----
WRITE(56,*)'DATE :~', DATE
WRITE(56,*)'NO :~', NO WRITE(56,*)'VALEUR DE REFERENCE(Vo):~', Vo
WRITE(56,*)
WRITE(56,30)

C
C   Temps d'attente entre chaque lecture en millièrne de seconde
C   -----
ITIME=925

C
C   Acquisition des données
C   -----
DO 5 II=1,2500

C
TOTAL=0.0
VITMOY=0.0
COMPTEUR=COMPTEUR+1

C
DO 15 I=1,5

C
C   Vitesse dans le tunel: CANAL 0
C   -----
CALL AINS(ADAPT,DEVICE,CHANL0,CTRL,RAWVA0,STAT)
VIT=FLOAT(RAWVA0)

C
C   Condition pour que la vitesse ne soit pas négative et calcul de

```



```

C      la vitesse moyenne pour 5 lectures
C      -----
      IF (VIT.GE.VO) THEN
        VITESS=FVITESS(VO)
      ELSE
        VITESS=FVITESS(VIT)
      ENDIF
      TOTAL=TOTAL+VITESS
      VITMOY=(TOTAL/5.0)*1.031

C
C      Délais d'attente entre chaque lecture
C      -----
      CALL DELAY(ADAPT,ITIME,STAT)
      TIME=TIME+FLOAT(ITIME)/ITIME

C
15    CONTINUE

C
C      Augmentation de la vitesse
C      -----
      IF (VITMOY.LE.(VISEE-0.2))THEN
        RAWVA0=2047
        CALL AOUS(ADAPT,DEVICE,CHANL0,CTRL,RAWVA0,STAT)
        RAWVA1=4095
        CALL AOUS(ADAPT,DEVICE,CHANL1,CTRL,RAWVA1,STAT)

C
C      Diminution de la vitesse
C      -----
      ELSE IF (VITMOY.GE.(VISEE+0.2))THEN
        RAWVA1=2050
        CALL AOUS(ADAPT,DEVICE,CHANL1,CTRL,RAWVA1,STAT)
        RAWVA0=4095
        CALL AOUS(ADAPT,DEVICE,CHANL0,CTRL,RAWVA0,STAT)

C
C      Vitesse stable
C      -----
      ELSE
        RAWVA0=2047
        CALL AOUS(ADAPT,DEVICE,CHANL0,CTRL,RAWVA0,STAT)
        RAWVA1=2047
        CALL AOUS(ADAPT,DEVICE,CHANL1,CTRL,RAWVA1,STAT)

```

END IF

C

C

Pression d'air: CANAL 2

C

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

C

C

Pression d'eau: CANAL 3

C

-----  
CALL AINS(ADAPT,DEVICE,CHANL3,CTRL,RAWVA3,STAT)

C

C

Transformation des valeurs analogiques (0-4095)

C

-----  
PRESAIR=FLOAT(RAWVA2)\*(50/4095)  
PRESEAU=FLOAT(RAWVA3)\*(50/4096)

C

C

Calcul de la vitesse moyenne pour les valeurs inscrites au cours  
des 30 dernières secondes

C

-----  
TOTVITMOY=TOTVITMOY+VITMOY  
IF (COMPTEUR.GE.6) THEN  
    MOYENNE=TOTVITMOY/6.0  
    TOTVITMOY=0  
    COMPTEUR=0  
END IF

C

C

Impression des valeurs à l'écran et dans le fichier

C

-----  
IF (ILINE.EQ.1) THEN  
    WRITE(\*,\*)  
    WRITE(\*,70)  
    WRITE(\*,30)  
    ILINE=ILINE+1  
END IF  
ILINE=ILINE+1  
IF (ILINE.EQ.24) ILINE=1

C

IF (COMPTEUR.NE.0) THEN  
    WRITE(\*,10) PRESAIR,PRESEAU,VITMOY,TIME  
ELSE  
    WRITE(\*,20) PRESAIR,PRESEAU,VITMOY,TIME,MOYENNE

```

      END IF
C
      WRITE(56,10) PRESAIR,PRESEAU,VITMOY,TIME
C
C   Arrêt de la lecture des données si la pression d'air < 0.1 psi
C   -----
      IF (PRESAIR.LT.0.1) GOTO 666
C
C   Vérification des commandes sur les cartes d'acquisition
C   -----
      IF (STAT.NE.0) THEN
        WRITE(*,*)'ERREUR D"EXECUTION, STAT=',STAT
        GO TO 9999
      END IF
C
5    CONTINUE
C
C   Fermeture du fichier ACQUI.SI.DAT
C   -----
666  CLOSE(56)
C
C   Remise à zéro de la sortie digitale/analogique (D/A)
C   -----
      RAWVA0=2047
      CALL AOUS(ADAPT,DEVICE,CHANL0,CTRL,RAWVA0,STAT)
      RAWVA1=2047
      CALL AOUS(ADAPT,DEVICE,CHANL1,CTRL,RAWVA1,STAT)
C
C   Format des écritures dans le fichier et à l'écran
C   -----
      WRITE (*,*)
      WRITE (*,80)
      WRITE (*,*)
      WRITE (*,90)
      WRITE (*,*)
C
10   FORMAT(4X,F6.2,'~',8X,F6.2,'~',8X,F7.2,'~',9X,I5)
20   FORMAT(4X,F6.2,'~',8X,F6.2,'~',8X,F7.2,'~',9X,I5,'~',8X,F7.2)
30   FORMAT(2X,'P air (psi)~',3x,'P eau (psi)~',3x,
-   'Vitesse (m/s)~',3x,'Temps (sec)~',3X,'Vitesse moy.')
```

```
40  FORMAT(2X,'L"ACQUISITION SE TERMINE SI LA PRESSION < 0.1 psi')
45  FORMAT(2X,'ENTRER LE NUMERO DE L"ESSAI')
50  FORMAT(2X,'ENTRER LA DATE')
55  FORMAT(2X,'ENTRER LA VALEUR DE REFERENCE(VO)')
56  FORMAT(2X,'ENTRER LA VITESSE DU TUNNEL EN m/s')
57  FORMAT(2X,'L"APPAREIL VIT-CONTROL PEUT MAINTENANT')
58  FORMAT(2X,'    ETRE PLACE SOUS TENSION')
59  FORMAT(2X,'POUR DEBUTER L"ACQUISITION TAPER SUR (ENTER)')
60  FORMAT(A25)
70  FORMAT(14X,'** L"ACQUISITION EST PRESENTEMENT EN COURS **')
80  FORMAT(2X,'L"ACQUISITION EST TERMINEE')
90  FORMAT(2X,'LES DONNEES SONT DANS LE FICHIER ACQUISI.DAT')
9999 STOP
      END
```

```

C-----
C  NOM DU PROGRAMME:    PRESSE.FOR
C  GÉNÉRALITÉ: Marco Boudreault, assistant de recherche pour
C                  l'Équipe de Recherche en Ingénierie du Givrage
C                  des Structures (ÉRIGS), a collaboré à la
C                  conception de ce programme
C  UTILITÉS:  Acquisition du déplacement de la presse ainsi
C              que de la charge sur la cellule.
C              Ce programme effectue une lecture simple sur les
C              adresses des cartes d'acquisition pour chaque
C              incrément de la boucle DO.
C              Si la vitesse du déplacement de la presse est plus
C              grande que 1 mm/min, le nombre d'acquisitions
C              par seconde sera calculé par le programme et
C              l'acquisition sera effectuée par balayage continu.
C              Les données sont envoyées dans le fichier
C              PRESSE.DAT.
C              Les tildes (~) sont utilisés lors de l'ouverture
C              du fichier d'acquisition par le logiciel EXCEL.
C-----
C  Déclaration des variables
C  -----
C  INTEGER*4    ADAPT0, DEVICE, CTRL, STAT, II, SCHRON
C  INTEGER*4    CHANL0, CHANL1, RAWVA0, RAWVA1, CHANLO
C  INTEGER*4    CHANH1, COMPTE, DEPPIC, PIC, BLOCK, CUMUL
C  INTEGER*4    MARQUE, RATE, COUNT
C  INTEGER*2    RAWDTA(4000), MODE, STOR
C  REAL         DEPL, DEPLAC, DEPMEM, CHARGE, SOMM, CHAR
C  REAL         CHARG, CHARGT, TEMPS, TIME, TIMEX, CHRONO
C  REAL         CAPACI, VITES, EPAIS, DIAM, DEPPRE
C  CHARACTER    DATE*16, NO*5, OK*5, DEBUT*9, A,B,C,D
C
C  Initialisation des variables
C  -----
C  A=27
C  B=91
C  C=50
C  D=74

```

```

ADAPT0=0
DEVICE=9
CHANLO=0
CHANHI=1
CHANL0=0
CHANL1=1
RAWVA0=0
RAWVA1=1
CTRL=0
MODE=0
STOR=0
COUNT=2000
STAT=0
TIME=0
DEPPIC=0
PIC=20
COMPTE=0
BLOCK=0
DEPMEM=0
CHARGE=0
DEPPRE=0
CHAR=0
TIMEX=0
MARQUE=0
ITIME=1
DEBUT='PASSE'

```

C

C

Ouverture du fichier

C

-----

```
OPEN(75,FILE='PRESSE.DAT',STATUS='NEW')
```

C

C

Affichage des informations à l'écran

C

-----

```
WRITE(*,*) A,B,C,D
```

```
WRITE(*,39)
```

```
WRITE(*,40)
```

```
WRITE(*,54)
```

```
WRITE(*,55)
```

```
READ(*,111) OK
```

```
IF(OK.EQ.'0') GO TO 9999
```

C

C

Entrée des références de l'essai

```

C -----
5 WRITE(*,*) A,B,C,D
  WRITE(*,57)
  READ (*,110) DATE
  WRITE(*,58)
  READ (*,111) NO
  WRITE(*,59)
  READ (*,*) VITES
  WRITE(*,60)
  READ (*,*) EPAIS
  WRITE(*,61)
  READ (*,*) DIAM
  IF (VITES.LT.1) THEN
    WRITE(*,62)
    READ (*,*) SCHRON
  END IF
  WRITE(*,63)
  READ (*,*) CAPACI
  WRITE(*,*)
  WRITE(*,*)
  WRITE(*,54)
  WRITE(*,55)
  WRITE(*,56)
  READ (*,111) OK
  IF(OK.EQ.'0') GO TO 9999
  IF(OK.EQ.'1') GO TO 5

C
C  Écriture des références de l'essai dans le fichier
C  PRESSE.DAT et rafraîchissement de l'écran
C -----
  WRITE(75,64)DATE
  WRITE(75,65)NO
  WRITE(75,66)VITES
  WRITE(75,67)EPAIS
  WRITE(75,68)DIAM
  IF (VITES.LT.1) THEN
    WRITE(75,69) SCHRON
  ELSE

C
C  Calcul du nombre de balayages par seconde
C  des canaux de la carte d'acquisition
C -----

```

```

        RATE=33*VITES/(EPAIS+3)
        IF (RATE.GT.750) RATE=750
        WRITE(75,69) RATE
    END IF
    WRITE(75,*)
    WRITE(75,96)
C
C      Rafraîchissement de l'écran
C      -----
10  WRITE(*,*) A,B,C,D
    IF (VITES.LT.1) THEN
        WRITE(*,70)
    ELSE
        WRITE(*,71)
    END IF
    WRITE(*,72)
    WRITE(*,80) NO
    WRITE(*,81) VITES
    WRITE(*,82) EPAIS
    WRITE(*,83) DIAM
    IF (VITES.LT.1) THEN
        WRITE(*,84) SCHRON
    ELSE
        WRITE(*,84) RATE
    END IF
    WRITE(*,72)
    IF(DEBUT.EQ.'PASSE')THEN
        WRITE(*,85)
        WRITE(*,86)
        READ (*,111) DEBUT
        IF(DEBUT.EQ.'0') GO TO 9999
        DEBUT='PASSE PAS'
        GO TO 10
    END IF
    WRITE(*,90)
    WRITE(*,91)
    CAPACI=CAPACI*25
C
C      Condition pour le choix du type d'acquisition (simple ou balayage)
C      -----
    IF (VITES.LT.1.0) THEN

```



```

C      Conversion des paramètres et attente de l'augmentation
C      de la charge pour débiter l'acquisition simple
C      -----
C      WRITE(*,95)
C      WRITE(*,105)
C      CHRONO=1000/SCHRON
15     CALL AINS(ADAPT0,DEVICE,CHANL1,CTRL,RAWVA1,STAT)
C      CHARG=FLOAT(RAWVA1)*CAPACI/4095
C      IF (CHARG.LT.(CAPACI*0.002)) GOTO 15
C
C      Acquisition des données (Maximum de 24 heures et 96 heures
C      pour respectivement 4 et une acquisition par seconde).
C      -----
C      DO 20 II=1,345600
C
C      Lecture de l'horloge et cumulateur du temps d'acquisition
C      -----
C      CALL DELAY(ADAPT1,ITIME,STAT)
C      TIME=TIME+FLOAT(ITIME)/(SCHRON*ITIME)
C
C      Déplacement de la presse: CANAL 0
C      -----
C      CALL AINS(ADAPT0,DEVICE,CHANL0,CTRL,RAWVA0,STAT)
C      DEPL=FLOAT(RAWVA0)*19.6/4095
C
C      Charge sur la cellule de la presse: CANAL 1
C      -----
C      CALL AINS(ADAPT0,DEVICE,CHANL1,CTRL,RAWVA1,STAT)
C      CHARG=FLOAT(RAWVA1)*CAPACI/4095
C
C      Conditions pour accumuler les échelons de 0 à 10 volts sur
C      le déplacement et pour compenser les variations de tension
C      -----
C      IF (DEPL.LT.DEPMEM) THEN
C          SOMM=DEPL-DEPMEM
C          IF (SOMM.GT.-0.2) THEN
C              DEPL=DEPMEM
C          ELSE
C              COMPTE=COMPTE+1

```

```

        DEPPIC=PIC*COMPTE
        DEPLAC=DEPPIC+DEPL
    END IF
ELSE
    DEPLAC=DEPPIC+DEPL
END IF

```

C  
C  
C  
C  
C

Condition pour écrire, à l'écran et dans le fichier, seulement les variations du déplacement et la moyenne des charges correspondantes. Il y a un délais d'attente s'il n'y a pas d'écriture dans le fichier et à l'écran.

```

-----
IF (DEPL.GT.DEPMEM) THEN
    TIME=CHRONO-240
    IF (BLOCK.EQ.1) THEN
        WRITE(*,100) DEPMEM,CHARGT,TIMEX
        WRITE(75,101) DEPMEM,CHARGT,TIMEX
        BLOCK=0
        CHAR=0
        CUMUL=0
    ELSE
        WRITE(*,100) DEPMEM,CHARGE,TIMEX
        WRITE(75,101) DEPMEM,CHARGE,TIMEX
    END IF
ELSE
    ITIME=CHRONO-5
    CHAR=CHAR+CHARG
    CUMUL=CUMUL+1
    CHARGT=CHAR/CUMUL
    BLOCK=1
END IF
DEPMEM=DEPLAC
CHARGE=CHARG
TIMEX=TIME

```

C  
C  
C

Vérification des commandes sur les cartes d'acquisition

```

-----
IF (STAT.NE.0) THEN
    WRITE(*,*)'ERREUR D"EXECUTION, STAT=',STAT
    GOTO 9999
END IF

```

```

C
C      Arrêt de l'acquisition si la charge = 0 kg
C      -----
C      IF (CHARG.GT.5) MARQUE=1
C      IF(MARQUE.EQ.1)THEN
C          IF (CHARG.LT.0.5)
C              GOTO 666
C          END IF
20      CONTINUE
ELSE
C
C      Attente du déplacement de la presse (CANAL 0)
C      pour débuter l'acquisition par balayage
C      -----
C      WRITE(*,106)
25      CALL AINS(ADAPT0,DEVICE,CHANL0,CTRL,RAWVA0,STAT)
C      DEPL=FLOAT(RAWVA0)*19.6/4095
C      IF (DEPL.LT.0.5) GOTO 25
C
C      Acquisition (2000 balayages pour 4000 lectures)
C      -----
C      CALL AINSC(ADAPT0,DEVICE,CHANLO,CHANHI,CTRL,MODE,STOR,
1          COUNT,RATE,RAWDTA(1),STAT)
C
C      Vérification des commandes sur les cartes d'acquisition
C      -----
C      IF (STAT.NE.0) THEN
C          WRITE(*,*)'ERREUR D'EXECUTION, STAT=',STAT
C          GOTO 9999
C      END IF
C      WRITE(*,107)
C
C      Traitement des données recueillies lors du balayage
C      -----
C      DO 30 I=1,4000,2
C          DEPL=RAWDTA(I)
C          CHARG=RAWDTA(I+1)
C          DEPL=DEPL*19.6/4095
C          CHARG=CHARG*CAPACI/4095
C          TEMPS=I

```

```

TIME=TEMPS/RATE
C
C      Condition pour écrire dans le fichier seulement les variations
C      du déplacement et les moyennes des charges correspondantes
C      -----
      IF (DEPL.LT.DEPMEM) THEN
        DEPL=DEPMEM
      END IF
      IF (DEPL.GT.DEPMEM) THEN
        IF (BLOCK.EQ.1) THEN
          WRITE(75,101) DEPMEM,CHARGT,TIMEX
          BLOCK=0
          CHAR=0
          CUMUL=0
        ELSE
          WRITE(75,101) DEPMEM,CHARGE,TIMEX
        END IF
      ELSE
        CHAR=CHAR+CHARG
        CUMUL=CUMUL+1
        CHARGT=CHAR/CUMUL
        BLOCK=1
      END IF
      DEPMEM=DEPL
      CHARGE=CHARG
      TIMEX=TIME*0.53
30    CONTINUE
      END IF
C
C      Fermeture du fichier PRESSE.DAT
C      -----
666  CLOSE(75)
C
C      Format des écritures dans le fichier et à l'écran
C      -----
      WRITE (*,108)
      WRITE (*,*)
      WRITE (*,109)
      READ(*,111) OK
39  FORMAT(2X,'***** ACQUISITION DE DONNEES *****'/
1      2X,'*****'//

```

```

1      2X,'CE PROGRAMME EFFECTUE L"ACQUISITION SELON LES'/
1      2X,'DEUX MODES SUIVANTS: '//
1      2X,'1- SIMPLE. SI LA VITESSE DE LA PRESSE < 1 mm/min'/
1      2X,'      Temps d"acquisition maximum: 96 heures si 1/sec'/
1      2X,'      24 heures si 4/sec'/
1      2X,'      L"acquisition debute avec l"augmentation de la'/
1      2X,'      charge et se termine lorsqu"elle = 0 kg'//
1      2X,'2- BALAYAGE. SI LA VITESSE DE LA PRESSE >= 1 mm/min'/
1      2X,'      Le programme calcule le nombre d"acquisitions'/
1      2X,'      par seconde et effectue 2000 lectures par canal.'/
1      2X,'      L"acquisition debute lorsque la cellule de la'/
1      2X,'      presse aura complete un deplacement de 0.5 mm '/
1      2X,'      et aucun affichage des donnees ne sera effectue.'
1      /)
40     FORMAT(2X,'*****'/)
54     FORMAT(2X,'Pour continuer presser ( ENTER )')
55     FORMAT(2X,'Pour sortir presser zero ( 0 )')
56     FORMAT(2X,'Pour des modifications presser ( 1 )')
57     FORMAT(2X,'ENTRER LA DATE')
58     FORMAT(2X,'ENTRER LE NUMERO DE L"ESSAI')
59     FORMAT(2X,'ENTRER LA VITESSE DE LA PRESSE EN mm/min')
60     FORMAT(2X,'ENTRER L"EPAISSEUR DE LA GLACE EN mm')
61     FORMAT(2X,'ENTRER LE DIAMETRE EXTERIEUR DE LA GLACE EN mm')
62     FORMAT(2X,'ENTRER LE NOMBRE D"ACQUISITION ( MAX.=4/sec )')
63     FORMAT(2X,'ENTRER LA CAPACITE DE CHARGE DE LA PRESSE EN %')
64     FORMAT(2X,'DATE :~~~~',A16)
65     FORMAT(2X,'NO :~~~~',A5)
66     FORMAT(2X,'VITESSE DE LA PRESSE=~~~~',F8.4,'~(mm/min)')
67     FORMAT(2X,'EPAISSEUR DE LA GLACE=~~~~',F4.1,'~(mm)')
68     FORMAT(2X,'DIAMETRE EXTERIEUR DE LA GLACE=~~~~',F4.1,'~(mm)')
69     FORMAT(2X,'NOMBRE D"ACQUISITION PAR SECONDE=~~~~',I5, '/')
70     FORMAT(11X,'***** ACQUISITION SIMPLE *****')
71     FORMAT(11X,'***** ACQUISITION PAR BALAYAGE *****')
72     FORMAT(11X,'*****'/)
80     FORMAT(11X,'NUMERO DE L"ESSAI: _____',A5)
81     FORMAT(11X,'VITESSE DE LA PRESSE: _____',F8.4)
82     FORMAT(11X,'EPAISSEUR DE LA GLACE: _____',F4.1)
83     FORMAT(11X,'DIAMETRE EXTERIEUR DE LA GLACE: _____',F4.1)
84     FORMAT(11X,'NOMBRE D"ACQUISITION PAR SECONDE: ____',I5, '/')
85     FORMAT(11X,'POUR DEBUTER L"ATTENTE PRESSER _____ ( ENTER )')
86     FORMAT(11X,'POUR SORTIR PRESSER _____ ( 0 )')
90     FORMAT(11X,'++++PROGRAMME D"ACQUISITION EN FONCTION++++')
91     FORMAT(11X,'++++'+)
95     FORMAT(13X,'DEPLACEMENT(mm)',3X,'CHARGE(kg)',4X,'TEMPS(sec)')

```

```
96  FORMAT(11X,'DEP.(mm)~',3X,'CHARGE(kg)~',3X,'TEMPS(sec)')
100  FORMAT('+',16X,F7.3,10X,F7.2,6X,F9.2)
101  FORMAT(8X,F9.3,'~',7X,F9.2,'~',6X,F11.4)
105  FORMAT('+',11X,'L"ACQUISITION DEBUTERA SI LA CHARGE AUGMENTE')
106  FORMAT('+',11X,'L"ACQUISITION DEBUTERA SI LA PRESSE SE DEPLACE')
107  FORMAT('+',15X,'PRESENTEMENT EN TRAITEMENT DES DONNEES',4X)
108  FORMAT('+',13X,'((((((( L"ACQUISITION EST TERMINEE ))))))))')
109  FORMAT(11X,'LES DONNEES SONT DANS LE FICHIER PRESSE.DAT')
110  FORMAT(A16)
111  FORMAT(A5)
9999 STOP
      END
```