

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE D'UN JOINT D'ÉTANCHÉITÉ

par

Richard DUFOUR

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU GRADE DE MAÎTRE ES SCIENCES APPLIQUÉES (M.Sc.A.)

Novembre 1989



National Library
of Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Canadian Theses Service Service des thèses canadiennes

Ottawa, Canada
K1A 0N4

The author has granted an irrevocable non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of his/her thesis by any means and in any form or format, making this thesis available to interested persons.

The author retains ownership of the copyright in his/her thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without his/her permission.

L'auteur a accordé une licence irrévocable et non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de sa thèse de quelque manière et sous quelque forme que ce soit pour mettre des exemplaires de cette thèse à la disposition des personnes intéressées.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège sa thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

ISBN 0-315-58174-3

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Ce mémoire intitulé:

ÉTUDE DU COMPORTEMENT MÉCANIQUE D'UN JOINT D'ÉTANCHÉITÉ

présenté par: Richard DUFOUR

en vue de l'obtention du grade de: M.Sc.A.

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. Raymond GAUVIN, D.Sc.A.

M. Jean-Pierre CHALIFOUX, Ph.D.

M. Henri YELLE, Ph.D., président

SOMMAIRE

Cet ouvrage complète le travail entrepris par M. Ripert, le concepteur du joint d'étanchéité utilisé par la compagnie VELAN.

Une étude des polymères susceptibles d'être utilisés pour la fabrication des joints d'étanchéité a été faite. Les fluoropolymères demeurent les candidats les plus sérieux, étant donné la vaste gamme de produits chimiques et les grands écarts de température auxquels ils peuvent être soumis. Plusieurs polymères, notamment le PEEK et le UHMWPE, sont aussi d'excellents candidats pour certaines applications.

L'étude expérimentale a permis de mettre en évidence le comportement mécanique de joints faits de UHMWPE, de PTFE et de PTFE + 15 % de fibres de verre. La rigidité de chacun de ces joints a pu être déduite ainsi que certaines de leurs caractéristiques viscoélastiques.

Finalement, une modélisation par la méthode des éléments finis a été réalisée. Les déplacements mesurés lors de la série d'essais se sont révélés être très près de ceux prévus par cette approche analytique. Ceci permet de croire

que le comportement de la plupart des joints d'étanchéité de la compagnie VELAN peut être prédit par cette méthode.

ABSTRACT

This work completes M. Ripert's report on the design of ball valves manufactured by the company VELAN Inc.

A study of the polymers more likely to be used for seals in this application was completed. In regard of the different chemical environments and the wide temperature variations in which the seats may operate, fluoropolymers are the best candidates. However, several other polymers should be considered for special applications.

A series of experiments was performed on seals currently used by VELAN; there are made of: UHMWPE, PTFE and PTFE + 15 % glass fibers. The mechanical behavior was investigated using a modified valve assembly. Both short and long term cyclic loading were considered to take into account the viscoelastic nature of these materials.

Finally, a finite element analysis was carried on to correlate the calculated movements of the seals and the movements monitored during the experiments. Finite element models were confirmed as an excellent way to predict the behavior of most ball valve seals.

REMERCIEMENTS

Je désire exprimer ma reconnaissance à la direction de l'École Polytechnique et à la direction du département de génie mécanique pour m'avoir permis d'entreprendre et de mener à bien ces travaux.

Je tiens d'abord à remercier messieurs Jean-Pierre Chalifoux et Mirek Hubacek qui ont dirigé ces travaux et qui m'ont accordé leur enseignement précieux tout au long du projet.

Je voudrais également exprimer ma reconnaissance à madame Nathalie Houle en qui j'ai trouvé soutien et encouragement.

Je veux remercier mademoiselle Josée Dugas pour le soin apporté à la dactylographie de ce mémoire et je remercie également l'ensemble du personnel de laboratoire ainsi que mes camarades étudiants pour leur sympathique et efficace collaboration.

Ce projet a été rendu possible grâce à une bourse de la compagnie VELAN. Que celle-ci trouve ici l'expression de mes meilleurs sentiments.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	iv
ABSTRACT	vi
REMERCIEMENTS	vii
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES TABLEAUX	xv
LISTE DES SYMBOLES	xvi
CHAPITRE I - INTRODUCTION	1
CHAPITRE II - CONCEPTION DES JOINTS D'ÉTANCHÉITÉ:	
RÉSUMÉ DU RAPPORT "RIPERT"	5
2.1 Autocompensation pour les écarts dimensionnels dus aux tolérances de fabrication	5
2.2 Le facteur de contact	8
2.3 Accroissement de l'aire de contact	8
2.4 Le facteur PV	10
2.5 Problèmes lors de l'ouverture et de la fermeture de la valve	10
CHAPITRE III - MATÉRIAUX DISPONIBLES POUR LA FABRICATION DES JOINTS D'ÉTANCHÉITÉ	11
3.1 Description des matériaux disponibles	11
3.1.1 Fluoropolymères	12
3.1.1.1 Polytétrafluoroéthylène (PTFE) ..	12
3.1.1.2 PTFE renforcé	16
3.1.1.3 Autres fluoropolymères	22
3.1.2 Polyoléfines	23

3.1.2.1	Polyéthylène haute densité	23
3.1.2.2	Polypropylène (PP)	24
3.1.3	Polyamides (PA)	24
3.1.4	Polyoxyméthylène (POM)	25
3.1.5	Polyimide	26
3.1.6	Polyphénylène sulfuré (PPS)	26
3.1.7	Polyéther ether ketone (PEEK)	27
3.1.8	Autres polymères	27
3.2	Critères de choix des matériaux	28
3.2.1	Résistance chimique	28
3.2.2	Propriétés mécaniques	31
3.2.3	Propriétés tribologiques	31
3.2.3.1	Coefficient de friction	31
3.2.3.2	Usure du joint d'étanchéité	36
3.2.3.3	Usure de la bille	37
3.2.4	Effet de la température sur le comporte- ment mécanique	37
3.2.5	Les coûts	40
CHAPITRE IV - EXPÉRIENCES SUR LES JOINTS D'ÉTANCHÉITÉ ..		52
4.1	Montage expérimental	52
4.2	Programmes dédiés	54
4.2.1	Programme de calibration	54
4.2.2	Programme d'acquisition et d'emmagasine- de données	57
4.2.3	Programme de représentation graphique	57
4.3	Description des joints d'étanchéité testés	60

4.4	Mesures sur le joint d'étanchéité	63
4.5	Tests	66
4.5.1	Tests de courte durée	68
4.5.2	Tests de longue durée	78
CHAPITRE V - MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS		83
5.1	Modèle d'éléments finis du joint d'étanchéité ...	83
5.1.1	Conditions aux frontières	86
5.1.2	Distribution de la force	86
5.2	Performance du modèle	88
5.3	Discussion	90
CONCLUSION		92
RÉFÉRENCES		94
ANNEXE A - DESSIN D'ASSEMBLAGE DE LA VALVE ÉTUDIÉE		97
ANNEXE B - RÉSULTATS DU TEST SUR L'APPAREIL DMTA POUR LE PTFE		99
ANNEXE C - DESCRIPTION DES TESTS DE TRACTION EFFECTUÉS SUR QUELQUES POLYMÈRES		103
ANNEXE D - IMPRIMÉS DES PROGRAMMES ÉCRITS		106
ANNEXE E - RÉSULTATS DE LA SÉRIE DE TESTS SUR LES JOINTS D'ÉTANCHÉITÉ		114
ANNEXE F - DONNÉES ET RÉSULTATS DE L'ANALYSE PAR ÉLÉ- MENTS FINIS		123

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	- Les cinq modèles de valve à clapet sphérique fabriqués par la compagnie Velan	2
Figure 2.1	- Coupe transversale d'un joint d'étanchéité "VELAN"	6
Figure 2.2	- Coupe transversale d'un joint d'étanchéité dit passif; modèle standard utilisé par quelques-uns des compétiteurs	7
Figure 2.3	- Écoulement à froid augmentant l'aire de contact (bille/joint) dans le cas d'un joint d'étanchéité dit passif	9
Figure 3.1	- Comportement en fluage du PTFE	13
Figure 3.2	- Modules de stockage (E') et perte (E'') du PTFE en fonction de la température	15
Figure 3.3	- Mauvaise répartition des fibres de verre (15 %) dans un joint d'étanchéité en PTFE (pièce produite par moulage sous pression en continue); rupture à l'azote liquide ..	18
Figure 3.4	- Bonne distribution des fibres de verre (15 %) dans un joint d'étanchéité en PTFE, moulé sous pression statique; rupture à l'azote liquide	19
Figure 3.5	- Distribution du bronze (40 %) dans un joint d'étanchéité; rupture à l'azote liquide	20

Figure 3.6	- Observation de la non-adhérence du bronze à une matrice de PTFE; rupture à l'azote liquide	21
Figure 3.7	- Coefficient de friction dynamique en fonction de la température pour plusieurs polymères lorsqu'ils frottent sur de l'acier	33
Figure 3.8	- Coefficient de friction dynamique du PA 6/6 frottant sur de l'acier en fonction de la force normale pour différentes vitesses ..	35
Figure 3.9	- Pression en fonction de la vitesse pour éviter une usure excessive, pour plusieurs polymères	38
Figure 4.1	- Coupe transversale de la portion inférieure de la valve	53
Figure 4.2	- Montage expérimental	55
Figure 4.3	- Organigramme du programme de calibration .	56
Figure 4.4	- Organigramme du programme d'acquisition et d'emmagasinement des données	58
Figure 4.5	- Organigramme du programme de représentation graphique	61
Figure 4.6	- Dimensions des joints d'étanchéité machinés pour une valve de type SB 300, 2"; toutes les dimensions sont en mm	62

Figure 4.7 - Coupe transversale d'un joint d'étanchéité; mesures prises avant et/ou après chaque test	64
Figure 4.8 - Technique utilisée pour mesurer la dis- tance entre l'arrière du joint d'étanché- ité et le boîtier de la valve	65
Figure 4.9 - Tests faits sur les joints d'étanchéité ..	67
Figure 4.10 - Représentation typique de données brutes pour les trois variables d'un test de courte durée	69
Figure 4.11 - a) Pression en fonction du temps dans les premiers instants des expériences sur les joints d'étanchéité; à 2.1 MPa	72
b) Déplacements correspondants de la bille et de la partie arrière du joint d'étanchéité en fonction du temps	72
Figure 4.12 - a) Pression en fonction du temps dans le stade initial des expériences sur les joints d'étanchéité; à 5.5 MPa	73
b) Déplacements correspondants de la bille et de la partie arrière du joint d'étanchéité en fonction du temps	73
Figure 4.13 - Pression en fonction de la distance par- courue de la partie arrière du joint éta- blissant la rigidité du joint d'étanchéité	75

Figure 4.14 - Constante de rigidité des joints d'étanchéité en fonction de la journée du test ($P = 2.1$ MPa)	76
Figure 4.15 - Largeur du joint d'étanchéité, A , au début d'un test, en fonction de la journée du test	77
Figure 4.16 - Premier cycle lors des tests de longue durée, illustré par le déplacement de la bille	80
Figure 4.17 - Positions de la bille lors des tests à $P = 5.5$ MPa. Les courbes représentent l'enveloppe de la zone de déformation	81
Figure 4.18 - Positions de la bille lors des tests à $P = 2.1$ MPa. Les courbes représentent l'enveloppe de la zone de déformation	82
Figure 5.1 - Processus de raffinement du modèle mathématique du joint d'étanchéité	84
Figure 5.2 - Modèle définitif d'éléments finis et conditions aux frontières	85
Figure 5.3 - Calcul de la force normale, F_N , appliquée au joint d'étanchéité (F_{Nx} et F_{Ny} sont les projections sur les axes principaux de F_N)	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 - Dérivés les plus communs du PTFE	22
Tableau 3.2 - Résistance chimique de quelques-uns des polymères étudiés	29
Tableau 3.3 - Coefficient de friction dynamique pour plusieurs polymères lorsqu'ils glissent sur l'acier (sec ou lubrifié avec de l'eau)	34
Tableau 3.4 - Caractéristiques importantes des polymères étudiés	41
Tableau 4.1 - Paramètres étudiés dans les tests à court terme	71

LISTE DES SYMBOLES

A, A'	: largeur du joint d'étanchéité avant et après chaque test (mm)
B, B'	: épaisseur du joint d'étanchéité avant et après chaque test (mm)
C	: largeur de la bande de contact entre le joint d'étanchéité et la bille lorsque la valve est sous pression (mm)
D	: distance entre l'arrière du joint d'étanchéité et le boîtier de la valve (mm)
E	: module de traction: relation entre la contrainte et la déformation lors d'un test de traction (MPa)
E'	: module de stockage dynamique (Pa)
E''	: module de perte dynamique (Pa)
$F()$	: facteur de calibration des capteurs (mm/volt) ou (MPa/volt)
F_F	: force de friction agissant sur un corps (N)
F_N	: force normale agissant sur un corps (N)
$F_{N X}$	: projection de F_N sur l'abscisse (N)
$F_{N Y}$	: projection de F_N sur l'ordonnée (N)
F_T	: force totale qui est appliquée sur la bille résultant de la pression dans la valve (N)
F_1	: paramètre contrôlant la fréquence d'acquisition dans le programme d'acquisition de données (-)

I	: compteur à l'organigramme de la figure 4.4 (-)
NN	: nombre de données à être emmagasinées par capteur dans le programme d'acquisition de données (-)
P	: pression appliquée dans la valve (MPa)
Pmax	: pression maximale pendant un test (MPa)
PV	: produit maximal entre la pression et la vitesse lors de tests d'usure ou de frottement (MPa.M/s)
R	: rayon de la bille (mm)
S	: aire de la bille en contact avec le fluide sous pression (mm)
S _f	: facteur de contact: rapport entre la contrainte de contact minimale (σ_s) entre la bille et le joint et la pression (p) afin d'assurer l'étanchéité de la valve (-)
V _F	: voltage final lors des tests pour chacun des capteurs (volt)
V ₀	: voltage initial lors des tests pour chacun des capteurs (volt)
X	: déplacement de l'arrière du joint d'étanchéité mesuré par le capteur de déplacement #1 (DT1) (mm)
Xel	: déplacement élastique du joint d'étanchéité suite à une pression imposée dans la valve lors d'un test de courte durée (mm)

- Xe.rec : recouvrement élastique du joint d'étanchéité quand la pression est relâchée lors d'un test de courte durée (mm)
- Xfin : position de l'arrière du joint d'étanchéité à la fin du test (DT1) de courte durée (mm)
- Xmax : déplacement maximal du joint d'étanchéité après 60 secondes sous pression lors d'un test de courte durée (mm)
- Xt.rec : recouvrement total (élastique + viscoélastique) du joint d'étanchéité à la fin du test (DT1) de courte durée (mm)
- Y : déplacement de la bille mesuré par le capteur de déplacement #2 (DT2) (mm)
- Yel : déplacement de la bille correspondant à Xel lors d'un test de courte durée (mm)
- Ye.rec : recouvrement élastique du joint d'étanchéité tel que mesuré par le trajet de la bille quand la pression est relâchée lors d'un test de courte durée (mm)
- Yfin : position de la bille à la fin du test (DT2) de courte durée (mm)
- Yma : position maximale de la bille lors d'un test de longue durée (mm)
- Ymax : déplacement maximal de la bille après 60 secondes sous pression lors d'un test de courte durée (mm)

- Y_{mi} : position minimale de la bille lors d'un test de longue durée (mm)
 Y_0 : position initiale de la bille lors d'un test de longue durée (mm)
 $Y_{t.rec}$: recouvrement total (élastique + viscoélastique) du joint d'étanchéité tel que mesuré lors d'un test de courte durée (mm)
 $\Delta P/\Delta t$: taux d'augmentation dans la pression lors d'un test de courte durée (MPa/s)
 $\Delta P/\Delta X$: rigidité du joint d'étanchéité établie par la portion linéaire d'un graphique P vs X lors d'un test de courte durée (MPa/mm)
 $\Delta X/\Delta t$: vitesse à laquelle l'arrière du joint d'étanchéité se déforme lorsque la pression est appliquée lors d'un test de courte durée (mm/s)
 $\Delta Y/\Delta t$: vitesse à laquelle la bille se déplace quand la pression est appliquée lors d'un test de courte durée (mm/s)
 μ : coefficient de friction (-)
 σ_s : contrainte de contact entre la bille et le joint (MPa)
 σ_y : contrainte à l'écoulement (MPa)
 $\% X_{t.rec}$: pourcentage de recouvrement du joint d'étanchéité (DT1) lors d'un test de courte durée (%)

Xmax

xx

% Yt.rec pourcentage de recouvrement du joint d'étanché-
———: ité tel que mesuré lors du trajet de la bille
Ymax (DT2) lors d'un test de courte durée (%)

CHAPITRE I

INTRODUCTION

La valve à clapet sphérique ("ball valve") fut conçue afin de répondre aux besoins de l'industrie qui requiert un robinet qui soit simple à manipuler et qui occasionne une très faible perte de pression.

La compagnie VELAN fabrique cinq modèles de valve à clapet sphérique (figure 1.1), lesquels sont rigoureusement évalués au niveau de la pression, de la température et des agents corrosifs. Chacune des valves manufacturées doit passer les deux tests de production suivants:

- 1- la résistance du boîtier est vérifiée à 1.5 fois la pression maximale recommandée (en position ouverte);
- 2- la valve, en position fermée, doit contenir une pression de 0.56 MPa sans signe de fuite (une pré-compression entre la bille et les joints est imposée lors de l'assemblage dans le but de passer ce test).

Un dessin d'assemblage de la valve étudiée dans ce travail - la SB-300, 2" - est reproduit à l'annexe A.

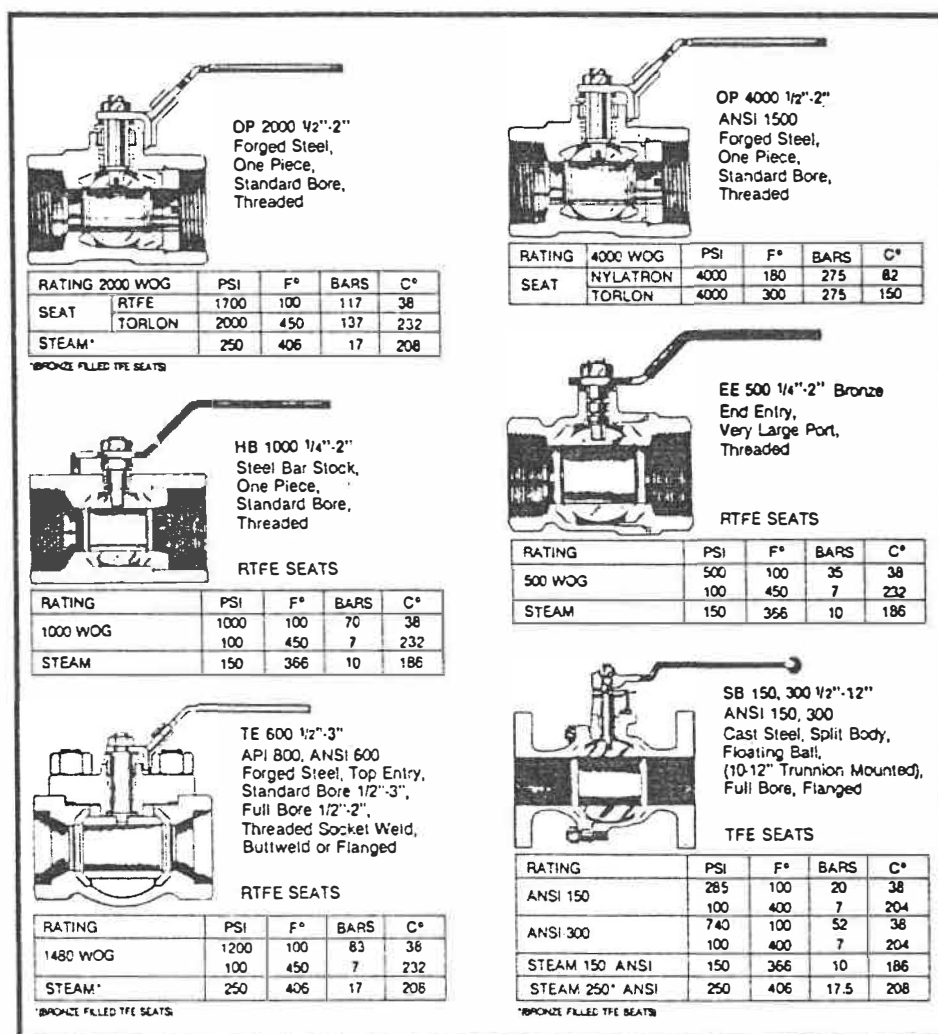


Figure 1.1 - Les cinq modèles de valve à clapet sphérique
fabriqués par la compagnie VELAN
(source: catalogue de la compagnie, 1987)

La relation entre la bille et les deux joints d'étanchéité de même que le contact entre ces joints et le boîtier de la valve jouent un rôle primordial en ce qui concerne l'étanchéité de la valve. Ces conditions, alliées au choix du matériau, contribuent à déterminer la pression maximale à laquelle la valve peut être soumise.

Ripert [1] fut le premier ingénieur à travailler à la conception originale des valves fabriquées par la compagnie VELAN. Il s'est attardé principalement à l'élaboration de joints d'étanchéité et au comportement des polymères vraisemblablement utilisables pour un tel usage.

Ce travail constitue une deuxième étude indépendante sur les joints d'étanchéité utilisés par la compagnie VELAN, particulièrement sur ceux du modèle "split body". De plus, il fait suite à une première étude sur les propriétés mécaniques du PTFE* [2] aussi entreprise à l'École Polytechnique.

* Polytétrafluoroéthylène (nom commercial: teflon)

Le but de cette étude est de comprendre le comportement mécanique des joints d'étanchéité à travers une série d'expériences et l'utilisation des éléments finis afin d'optimiser le choix des matériaux et des dimensions de ces joints en conservant toutefois le même type de géométrie.

CHAPITRE II

CONCEPTION DES JOINTS D'ÉTANCHÉITÉ:

RÉSUMÉ DU RAPPORT "RIPERT"

Le joint d'étanchéité "VELAN" (figure 2.1) a été conçu par Ripert selon cinq critères qui seront décrits subséquemment (lesquels seront repris ici sans modification).

2.1 AUTOCOMPENSATION POUR LES ÉCARTS DIMENSIONNELS DUS AUX TOLÉRANCES DE FABRICATION

À la différence d'un joint passif* (figure 2.2), la forme arquée des joints d'étanchéité "VELAN" permettra de reprendre facilement les différents niveaux de précompression imposés lors de l'assemblage de la valve (dus aux tolérances de fabrication). Le joint d'étanchéité - dit passif - n'acceptera pas autant de précompression et sera plus difficile à assembler afin de passer les tests de production.

* En ce sens que le joint d'étanchéité, contrairement aux dessins de Ripert, n'accepte pas autant de déformations élastiques lorsqu'il maintient la bille.

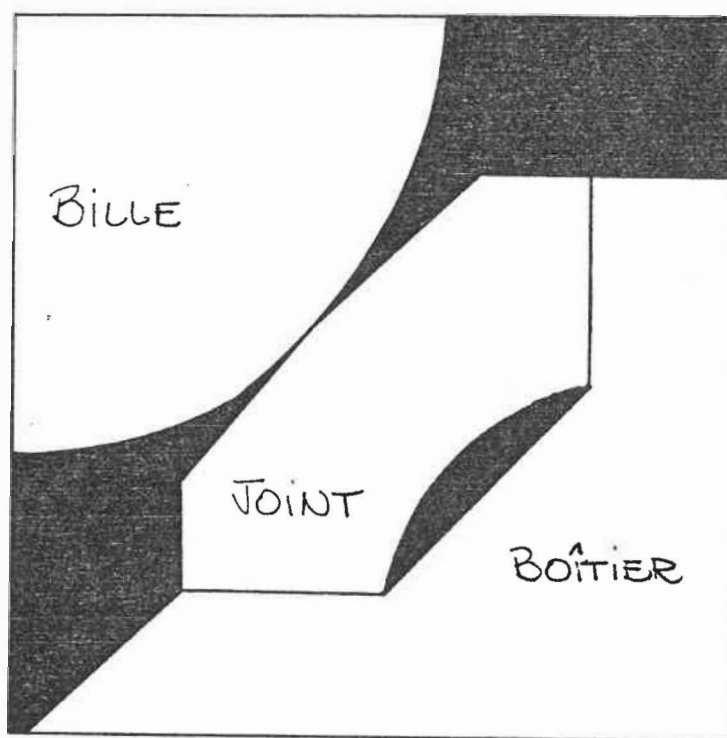


Figure 2.1 - Coupe transversale d'un joint d'étanchéité
"VELAN"

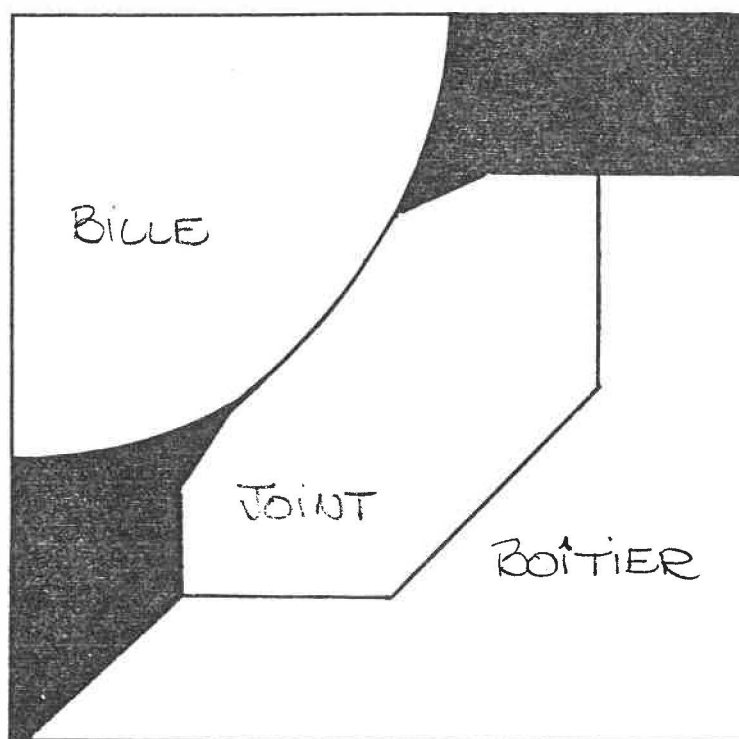


Figure 2.2 - Coupe transversale d'un joint d'étanchéité dit passif; modèle standard utilisé par quelques-uns des compétiteurs de la compagnie VELAN

2.2 LE FACTEUR DE CONTACT (seating factor: S_f)*

Ce facteur représente le rapport entre la contrainte de contact minimale (σ_s) (entre la bille et le joint) et la pression dans la valve (P) afin d'assurer l'étanchéité de celle-ci lorsqu'elle est en position "fermée". Cela s'exprime ainsi:

$$S_f = \frac{\sigma_s}{P} \quad (2.1)$$

2.3 ACCROISSEMENT DE L'AIRE DE CONTACT

Dans les modèles de joints d'étanchéité dits passifs, un écoulement à froid, en fluage, peut engendrer un accroissement de l'aire de contact (figure 2.3) réduisant la contrainte entre la bille et le joint. Ceci peut entraîner une fuite de liquide.

Selon Ripert, le joint d'étanchéité qu'il a conçu est moins sujet au problème de l'écoulement à froid en raison de sa forme arquée, quoique ce phénomène soit quand même présent.

* Voir la référence [3], section III, page 7, pour plus de détails.

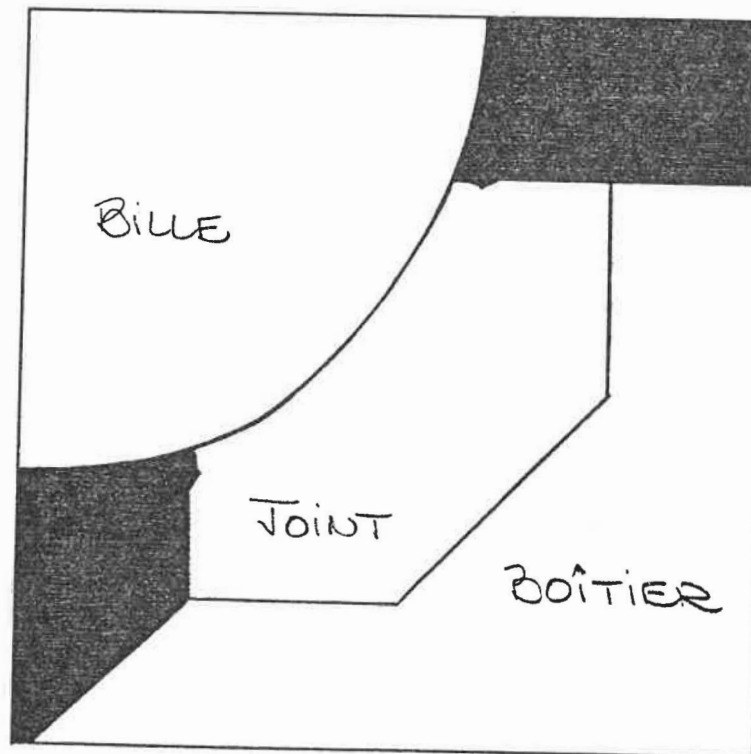


Figure 2.3 - Écoulement à froid augmentant l'aire de contact (bille/joint) dans le cas d'un joint d'étanchéité dit passif

2.4 LE FACTEUR PV

Ce facteur représente le produit maximal entre la pression et la vitesse lorsqu'un objet frotte continuellement sur un autre pour un taux d'usure défini*.

Ripert a tenu compte de ce facteur lors de la conception des joints d'étanchéité, en prenant pour acquis que la valve s'ouvrait et se refermait continuellement lorsqu'elle était sous pression.

2.5 PROBLÈMES LORS DE L'OUVERTURE ET DE LA FERMETURE DE LA VALVE

En ne permettant pas le passage de la pression derrière la partie arquée du joint d'étanchéité, Ripert espérait éviter une rupture de ce joint lors de l'ouverture ou la fermeture de la valve sous pression. La présence d'une pression derrière le joint d'étanchéité pourrait pousser ce joint hors de sa cavité juste assez pour que le trou de la bille en coince une partie contre le boîtier.

* Voir la référence [3], section V, pages 2 à 4, pour plus de détails.

CHAPITRE III
MATÉRIAUX DISPONIBLES POUR LA FABRICATION
DES JOINTS D'ÉTANCHÉITÉ

Il existe un nombre considérable de polymères qui sont acceptables pour la fabrication des joints d'étanchéité. Le but de ce chapitre est de fournir une description de ces polymères et de les comparer avec les critères requis pour fabriquer une valve à clapet sphérique. Ces critères sont:

- 1- résistance chimique aux liquides qui passent dans la valve;
- 2- propriétés mécaniques;
- 3- propriétés tribologiques;
- 4- effet de la température sur le comportement mécanique;
- 5- coût des matériaux.

3.1 DESCRIPTION DES MATÉRIAUX DISPONIBLES

Les propriétés mécaniques de tous ces polymères sont rassemblées au tableau 3.4 situé à la fin de ce chapitre.

3.1.1 Fluoropolymères

Ces polymères sont caractérisés par une très haute résistance chimique en raison de la liaison carbone-fluor. Leur coefficient de friction est extrêmement bas contre l'acier et leurs propriétés mécaniques à de hautes températures sont aussi excellentes.

3.1.1.1 Polytétrafluoroéthylène (PTFE)

La chaîne PTFE est constituée de fluor et de carbone. Ce polymère est généralement choisi pour son excellente résistance chimique, la large plage de température à laquelle il peut être utilisé et son coefficient de friction extrêmement bas contre le métal [3].

Ses propriétés mécaniques sont plus faibles que la plupart des polymères "techniques" et le fluage peut être relativement important pour de faibles contraintes (figure 3.1) [4].

Un appareil DMTA* ("Dynamic Mechanical Thermal Analyser") a été utilisé afin de caractériser les propriétés

* Voir l'annexe B pour une description du test et des conditions expérimentales.

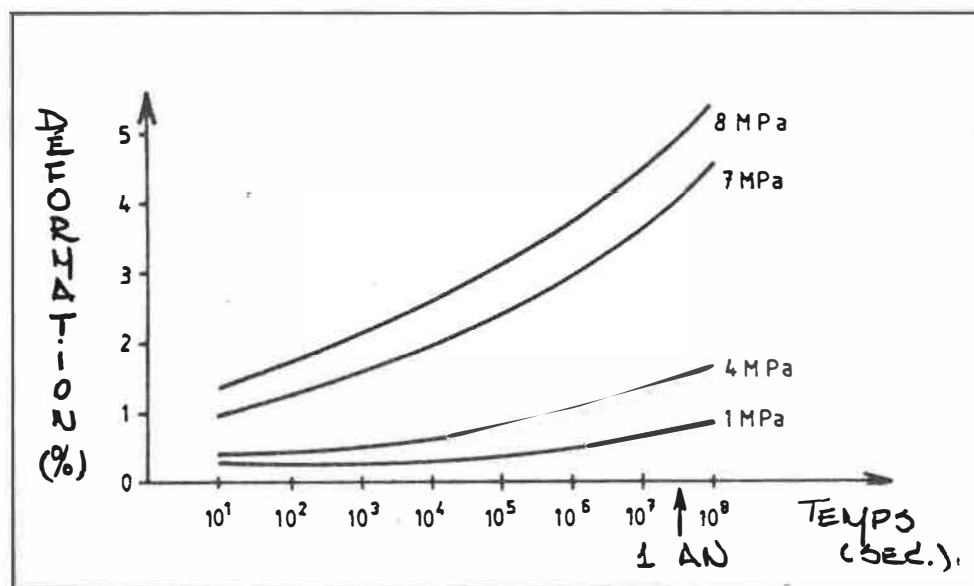


Figure 3.1 - Comportement en fluage du PTFE
(selon la référence [4])

mécaniques du PTFE à différentes températures. Ce polymère présente une zone de transition majeure proche de la température de la pièce tel qu'il est montré à la figure 3.2.

Cette température de transition correspond à une réorganisation de la chaîne moléculaire du PTFE [4].

Cette zone de transition peut être responsable d'un changement de dimension de près de un pour cent (1 %) quand un objet en PTFE est soumis à des fluctuations de température proche de la température de la pièce [4]. Ce fait doit être pris en considération quand un joint d'étanchéité est usiné ou est testé.

Les pièces en PTFE peuvent être faites par moulage sous pression en continue ou par moulage sous pression statique. Il a été démontré que le moulage sous pression statique confère au matériau de meilleures propriétés mécaniques, une plus faible porosité et une meilleure performance lorsque soumis à une sollicitation cyclique [2].

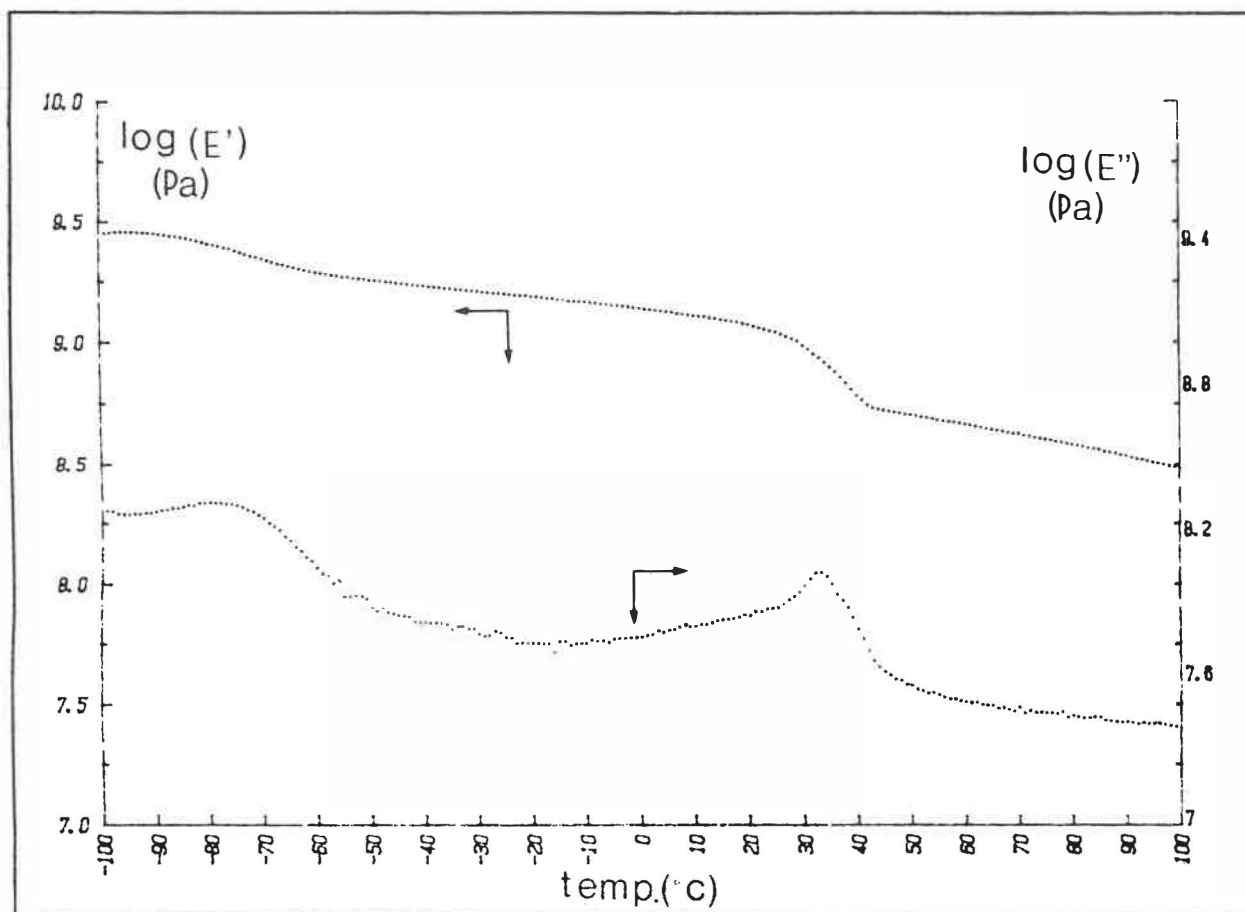


Figure 3.2 - Modules élastiques (E') et perte (E'') du PTFE
en fonction de la température

Il a été prouvé [2] qu'un test de traction est un excellent indicateur de la qualité du PTFE. En fait, pour un bon PTFE, la contrainte à l'écoulement ainsi que la contrainte et la déformation à la rupture sont plus élevées, tel qu'illustré à l'annexe C. Un test plus polyvalent a aussi été développé dans un ouvrage antérieur [2]. Ce test consiste à pénétrer avec une bille en acier, un petit disque de PTFE placé au centre d'un moulage en époxy. Une pression est appliquée pendant un certain temps, puis elle est relâchée. La recouvrance est un bon indicateur de la qualité du matériau. Ce test peut être réalisé sur des joints d'étanchéité de valves d'un pouce et plus (limitations dimensionnelles).

3.1.1.2 PTFE renforcé

Le PTFE est le plus souvent renforcé avec des fibres de verre, du bronze ou du bisulfide de molybdène. Le renforcement est surtout envisagé pour obtenir de meilleures propriétés mécaniques à de hautes températures, un plus faible fluage, une moindre usure et une meilleure stabilité dimensionnelle lorsque la température varie [5,6]. Cependant, les renforts sont susceptibles d'être attaqués par le fluide véhiculé.

Les procédés de fabrication ont un impact - tout comme dans le cas du PTFE vierge - sur les propriétés mécaniques des pièces produites. Il a été démontré [2] que le moulage sous pression en continue du PTFE renforcé produit des pièces de qualité inférieure (figures 3.3. et 3.4).

Les pièces faites par moulage sous pression en continue démontrent aussi une faible recouvrance suite à une sollicitation mécanique. Les pièces de PTFE renforcé doivent donc, par conséquent, être moulées sous pression statique, suivi d'un recuit [3]. Il a été démontré [2] que la contrainte et la déformation à la rupture dans un test de traction seront plus basses pour les échantillons renforcés par rapport aux échantillons de PTFE vierge (voir l'annexe C) parce qu'il est presque impossible de faire adhérer le PTFE avec le renfort (ou n'importe quoi d'autres, en fait!) [7].

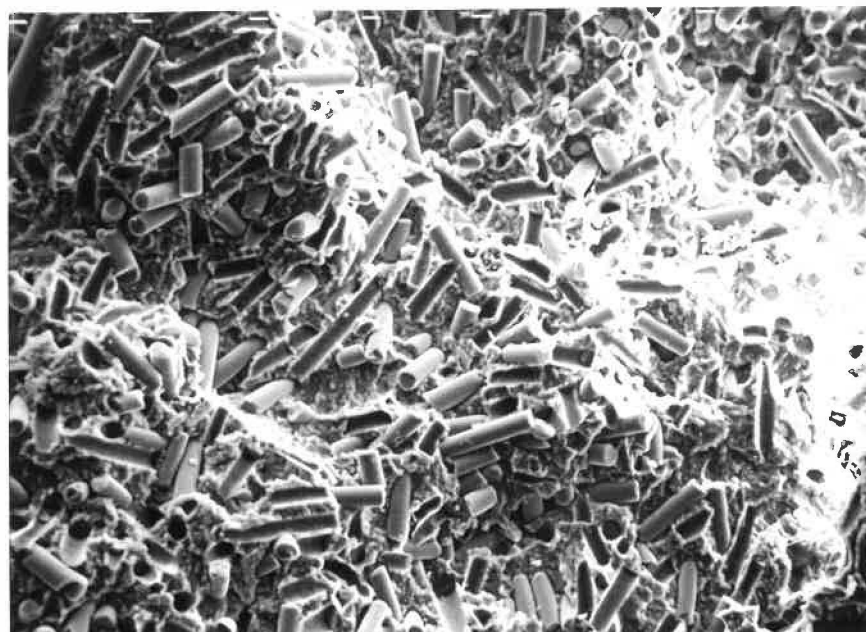
La compagnie VELAN utilise de la fibre de verre et, dans une moindre proportion, le bronze comme renfort de ses joints d'étanchéité en PTFE. Deux photographies d'un échantillon de PTFE renforcé de bronze sont reproduites aux figures 3.5 et 3.6.



0.2 mm



Figure 3.3 - Mauvaise répartition des fibres de verre (15 %) dans un joint d'étanchéité en PTFE (pièce produite par moulage sous pression en continue; rupture à l'azote liquide)



0.2 mm



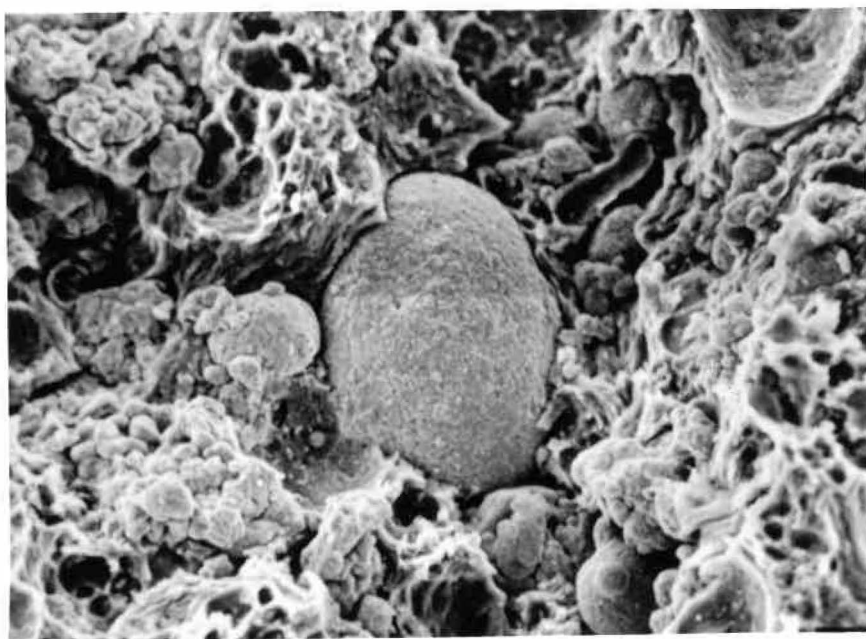
Figure 3.4 - Bonne distribution des fibres de verre (15%) dans un joint d'étanchéité en PTFE, moulé sous pression statique; rupture à l'azote liquide



0.4 mm



Figure 3.5 - Distribution du bronze (40%) dans un joint
d'étanchéité; rupture à l'azote liquide



0.05 mm



Figure 3.6 - Observation de la non-adhérence du bronze à une matrice de PTFE; rupture à l'azote liquide

3.1.1.3 Autres fluoropolymères

Les dérivés les plus communs du PTFE sont énumérés au tableau 3.1. Ils montrent généralement un plus haut module d'élasticité et sont plus faciles à mouler par injection ou à extruder. Leur résistance chimique est habituellement moindre que celle du PTFE [8].

Il est possible pour les polymères ETFE, ECTFE et PVDF-TFE d'adhérer aux fibres de verre ou de carbone parce que leurs atomes d'hydrogène peuvent être soumis aux forces de "Van der Waals". C'est pourquoi l'on peut obtenir de plus hauts modules de traction et de flexion pour ces polymères [8] en comparaison avec les autres fluoropolymères.

CTFE	: polychlorotrifluoroéthylène
EFTE	: éthylène-tétrafluoroéthylène copolymère
FED	: éthylène-propylène fluoré copolymère
PVDF	: polyvinylidène de fluor
ECTFE	: éthylène-chlorotrifluoroéthylène
PVDF-TFE	: vinylidène de fluor-tétrafluoroéthylène copolymère
PFA	: perfluoroalkoxy tétrafluoroéthylène modifié

Tableau 3.1 - Dérivés les plus communs du PTFE (d'après la référence [8])

3.1.2 Polyoléfines

Ces polymères sont caractérisés par une bonne résistance chimique, un bon coefficient de friction et de bonnes propriétés mécaniques jusqu'à 100°C [4].

3.1.2.1 Polyéthylène haute densité (UHMWPE)

Le radical de ce polymère se compose essentiellement de carbone et d'hydrogène. La polymérisation du UHMWPE peut se faire jusqu'à des poids moléculaires atteignant plusieurs millions. Cela a la particularité d'accroître les propriétés mécaniques, la résistance chimique et les propriétés tribologiques en comparaison avec des résines de poids moléculaire moindre [4].

Le UHMWPE est très difficile à injecter ou à extruder en raison de sa très grande viscosité quand il est à l'état fondu. Les pièces faites par extrusion ou forgeage produisent une structure hautement orientée. Cela a l'inconvénient de figer les contraintes internes causant des effets de mémoire non voulus quand une pièce est en opération à haute température.

Le UHMWPE est régulièrement utilisé par la compagnie VELAN pour ses applications à de basses températures.

3.1.2.2 Polypropylène (PP)

Le polypropylène a un module d'élasticité plus élevé que celui du UHMWPE. Sa résistance chimique est considérée comme étant bonne. Cependant, son coefficient de friction est relativement élevé (0.25 à 0.45) [4].

Le polypropylène est le plus souvent renforcé avec du talc, du mica ou de la fibre de verre afin d'obtenir un plus grand module de traction et de flexion ainsi qu'une meilleure performance mécanique à haute température. Le polypropylène peut aussi être renforcé avec du PTFE pour un coefficient de friction plus faible. Ceci rend le polypropylène utilisable pour la fabrication de joints d'étanchéité.

3.1.3 Polyamides (PA)

Il existe une grande variété de polyamides sur le marché. La plus commune étant le PA 6/6. Ce polymère, aussi connu commercialement sous le nom de "nylon", a une bonne résistance chimique quoiqu'il soit sensible à l'eau, causant ainsi des changements dimensionnels et une diminution de ses propriétés mécaniques [4]. Ce polymère a un haut module de traction, une excellente résistance à l'usure, un bas coef-

ficient de friction et conserve de bonnes propriétés mécaniques à de hautes températures [4,9].

Les polyamides sont souvent renforcés avec des fibres de verre pour augmenter les modules de flexion et de traction. Le carbone, le bisulfure de molybdène, l'huile ou le PTFE peuvent aussi être ajoutés pour diminuer le coefficient de friction [4,5].

Pour les usages concernés dans cette étude, il est préférable d'envisager les polyamides de types 6/10, 6/12, 11 ou 12, lesquels sont plus coûteux. Ces polymères conservent davantage leurs propriétés quand ils sont exposés à l'eau. Cependant, leur résistance à la chaleur et surtout leurs propriétés mécaniques sont plus faibles en comparaison à celles du PA 6/6 [5].

3.1.4 Polyoxyméthylène (POM)

Ce polymère, aussi connu commercialement sous le nom "acétal", démontre d'excellentes propriétés mécaniques jusqu'à 160°C. Il a un très faible coefficient de friction et une très bonne résistance chimique.

L'ajout de fibres de verre lui confère un module de traction élevé, de meilleures propriétés mécaniques à hautes

températures et moins de retrait dû à la cristallisation. Du PTFE peut être ajouté au POM comme lubrifiant mais cela se fera au détriment des propriétés mécaniques désirées.

3.1.5 Polyimide

Ce polymère très prometteur est relativement nouveau et est utilisable pour une grande plage de températures (jusqu'à 250°C). Il a une grande résistance à l'usure et une très bonne stabilité dimensionnelle s'il subit des fluctuations de température. Cependant, ce matériau est coûteux.

On peut incorporer du PTFE au polyimide si l'on veut obtenir un faible coefficient de friction ou avec des fibres de verre si l'on veut des modules de traction et de flexion accrus.

Ce polymère est intéressant pour la fabrication de joints d'étanchéité qui ne seront pas soumis à des fluides alcalins ou des acides inorganiques concentrés [9].

3.1.6 Polyphénylène sulfuré (PPS)

Ce polymère est utilisable sur une large plage de température (-200°C à 250°C). On ne lui connaît pas de solvant

sous 200°C et il a surtout d'excellentes propriétés mécaniques [9,10]. Son coefficient de friction est aussi très bas lorsqu'on lui ajoute du PTFE ($\mu = 0.09$) [6].

Ce polymère doit être envisagé pour la fabrication de joints d'étanchéité. L'expérimentation doit être plus complète en raison de la nouveauté de ce polymère.

3.1.7 Polyéther ether ketone (PEEK)

Ce polymère est actuellement utilisé par la compagnie VELAN pour des joints soumis à de la vapeur. Il a d'excellentes propriétés mécaniques et chimiques.

Quand il est renforcé avec des fibres de verre, ce polymère a d'excellentes performances mécaniques à hautes températures. Ce polymère est un candidat sérieux pour des applications difficiles.

3.1.8 Autres polymères

Il existe plusieurs autres polymères nouvellement développés qui pourraient être envisagés pour l'usage concerné dans cette étude. En ce moment, ils ne sont pas très bien connus et d'autres tests doivent être faits avant de pouvoir les recommander.

Ces polymères sont: polyamide-imide, polyether-imide et sulfide de polyéther. Ils montrent généralement de très bonnes propriétés mécaniques et chimiques. Ils ont tous d'excellentes propriétés mécaniques à hautes températures.

3.2 CRITÈRES DE CHOIX DES MATÉRIAUX

Dans cette partie du travail, les polymères aptes à être utilisés dans la fabrication des joints d'étanchéité sont comparés sur la base des cinq critères déjà énoncés.

3.2.1 Résistance chimique

Les données concernant le comportement des polymères, lorsqu'ils sont soumis à des substances chimiques, se retrouvent au tableau 3.2 [11].

Cependant, en plus de ces informations, il convient d'ajouter les faits suivants:

- le polyamide-imide est attaqué par des acides caustiques à de hautes températures. Ces polymères ne sont pas aptes à être utilisés en présence de vapeurs;
- à de hautes températures et sous de fortes concentrations, le PEEK est affecté par des acides oxydants, des bases organiques et des acides sulfoniques.

	Ali- phatic Hydro- carbons	Aro- matic Hydro- carbons	Oils, Fats, Waxes	Fully Halo- generated Hydro- carbons	Partly Halo- generated Hydro- carbons	Alco- hols Mono- hydric	Alco- hols Poly- hydric	Phenols	Ketones	Esters	Ethers
PTFE	Ex	Ex	Ex	Ex	Bon	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Bon
CTFE	Ex	Ex	Ex	Moy	Bon	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Bon
FEP	Ex	Ex	Ex	Ex	Bon	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Bon
Polypropylene	Moy	Moy	Bon	Faible	Faible à moy	Bon	Ex	Bon	Bon	Bon	Moy
Polyethylene	Moy	Moy	Ex	Faible	Faible	Moy	Bon	Bon	Bon	Bon	Good
Polyimide	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex
Polysulfone	Faible	Faible	Moy	Faible	Faible	Faible	Faible à moy	Faible	Faible	Faible	Faible
Polyphénylène sulfuré	Bon	Bon		Moy	Faible	Ex	Ex	Bon	Bon	Ex	Bon
Polyamide (nylon)	Bon	Moy	Bon	Moy	Faible	Bon	Bon	Bon	Bon	Moy	Bon

Tableau 3.2 - Résistance chimique de quelques-uns des polymères étudiés (tiré de la référence [5])

	Acides inorganiques		Bases		Sels			Acides organiques		Acides oxydants		Rayons solaires
	Conc.	Dilués	Conc.	Dilués	Aci- des	Neutres	Basi- ques	Conc.	Dilués	Conc.	Dilués	& intem- péries
PTFE	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Bon à Ex	Ex	Ex	Ex	Ex
CTFE	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex
FEP	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Bon à Ex	Ex	Ex	Ex	Ex
Polypropylène	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Bon	Ex	Faible	Bon	Faible
Polyéthylène	Bon à Ex	Ex	Bon	Bon	Ex	Ex	Ex	Ex	Ex	Fai- ble	Bon	Faible
Polyimide	Moy	Bon	Faible	Moy	Bon	Bon	Faible	Bon	Ex	Faible	Bon	Ex
Polysulfone	Bon	Bon	Bon	Ex	Bon	Ex	Bon	Moy	Bon	Faible	Bon	Bon à Ex
Polyphénylène sulfuré	Bon	Bon	Bon	Ex	Bon	Bon	Bon	Bon	Bon	Fai- ble	Moy	Bon
Polyamide (nylon)	Fai- ble	Bon	Bon	Ex	Fai- ble	Bon	Moy	Fai- ble	Moy	Fai- ble	Faible	Moy à bon

faible: usage non recommandé

moy : expositions courtes à basse température

bon : éviter les longues expositions à haute température

ex : non affecté par la substance

Tableau 3.2 - Résistance chimique de quelques-uns des polymères étudiés (tiré de la référence [5]) (suite)

3.2.2 Propriétés mécaniques

Toutes les propriétés mécaniques pertinentes qui concernent les joints d'étanchéité se retrouvent au tableau 3.4 placé à la fin de ce chapitre. Les résultats des tests de traction des échantillons de PTFE sont reproduits à l'annexe C.

Les aspects tribologiques et le comportement à haute température ont été étudiés séparément en raison de leur importance respective.

3.2.3 Propriétés tribologiques

Dans cette partie du travail, le coefficient de friction et l'usure ont été observés séparément étant donné leur importance spécifique lors de la conception des joints d'étanchéité. Cette étude ne représente qu'un survol de la tribologie et elle n'est mentionnée que pour illustrer les paramètres en jeu.

3.2.3.1 Coefficient de friction

Le coefficient de friction, μ , est défini comme le ratio entre la force de friction, F_f , opposant le mouvement

et la somme des forces normales au plan de friction, F_N , agissant sur un corps [12]. Cela s'exprime ainsi:

$$\mu = \frac{F_F}{F_N} \quad (3.1)$$

Le coefficient de friction dynamique est généralement plus faible que le coefficient de friction statique (sauf en ce qui concerne le PTFE).

Cette propriété est très importante car elle influence directement le couple d'opération de la valve et, par le fait même, la grosseur de l'actuateur à installer sur celle-ci.

Les facteurs suivants sont parmi ceux qui peuvent influencer le coefficient de friction.

1) Température

L'effet de la température sur le coefficient de friction pour plusieurs polymères est illustré graphiquement à la figure 3.7 [13].

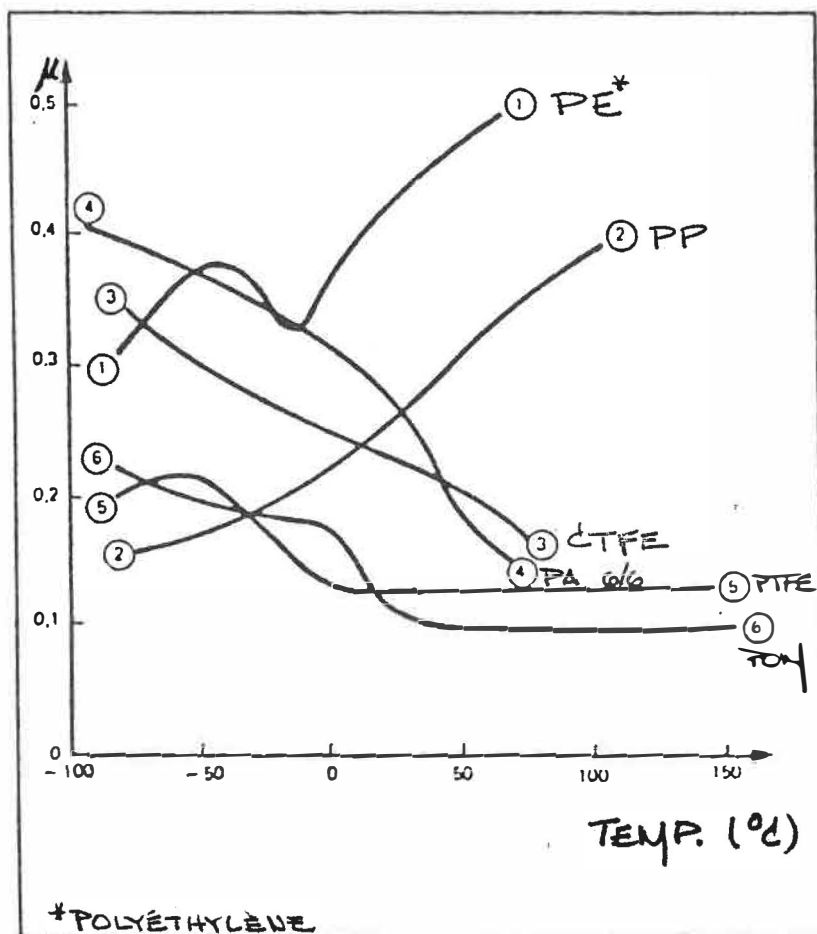


Figure 3.7 - Coefficient de friction dynamique en fonction de la température pour plusieurs polymères lorsqu'ils frottent sur de l'acier (tiré de la référence [13])

2) Force et vitesse

La figure 3.8 montre l'influence de ces deux facteurs sur le coefficient de friction pour le cas du PA 6/6.

3) Les lubrifiants

Selon les expériences de laboratoire de la compagnie VELAN, les liquides manipulés par une valve à clapet sphérique ont aussi une influence sur le couple d'opération mais la documentation sur ce sujet est plutôt rare.

Le tableau 3.3 montre l'influence de l'eau (comme lubrifiant) sur le coefficient de friction de plusieurs polymères lorsqu'ils glissent sur de l'acier poli [14].

	UHMWPE	Nylon 6/6	Nylon + MoS ₂	PTFE	Acétal copolymère
Sec	0.10-0.22	0.15-0.40	0.12-0.20	0.04-0.25	0.15-0.35
Lubrifié avec de l'eau	0.05-0.10	0.14-0.19	0.10-0.12	0.04-0.08	0.10-0.20

Tableau 3.3 - Coefficient de friction dynamique pour plusieurs polymères lorsqu'ils glissent sur l'acier (sec ou lubrifié avec de l'eau)

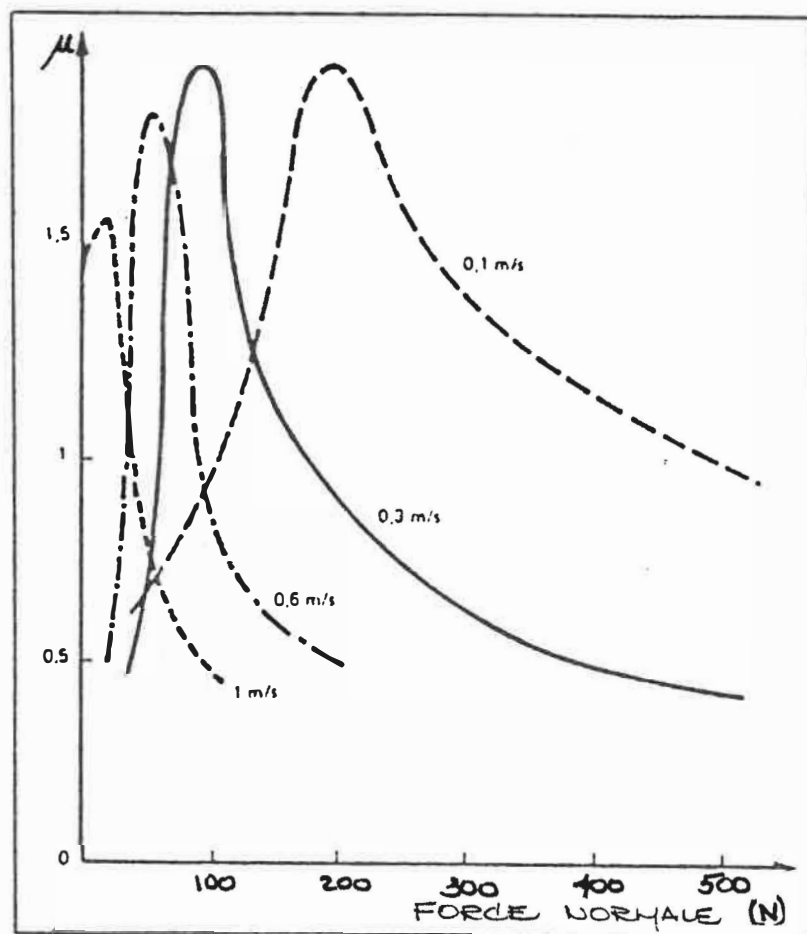


Figure 3.8 - Coefficient de friction dynamique du PA 6/6 frottant sur de l'acier en fonction de la force normale pour différentes vitesses (tiré de la référence [13])

4) Le fini de surface du joint d'étanchéité

Le fini de la surface d'un joint d'étanchéité en PTFE ne semble pas pouvoir jouer un rôle important dans la détermination du coefficient de friction. Cela peut s'expliquer par le fait que des joints faits de PTFE ou de UHMWPE se déforment sous la pression pour épouser la surface de la bille (fini miroir), quel que soit leur fini de surface. Des expériences doivent être faites sur des matériaux plus durs, comme le PPS ou le PEEK, pour lesquels le fini de la surface peut devenir un facteur plus important.

Une thèse de doctorat a été complétée à l'École Polytechnique [15] concernant les propriétés tribologiques du UHMWPE, du POM et du PA 6/6, en accordant une attention spéciale à l'influence de la force normale, de la vitesse et du fini de surface.

3.2.3.2 Usure du joint d'étanchéité

L'usure du joint d'étanchéité situé en aval prend de l'importance si la valve est opérée fréquemment. De telles conditions doivent être étudiées à la lumière des informations qui suivent.

Le facteur PV est souvent utilisé pour fixer les conditions limites pour l'usure du matériau. On peut contrôler cette usure en ajoutant un conducteur thermique comme le graphite, de la fibre de carbone ou du bronze. La figure 3.9 montre la relation entre la pression et la vitesse afin d'éviter une usure excessive pour plusieurs polymères [13].

3.2.3.3 Usure de la bille

L'incorporation de renforts abrasifs - telle la fibre de verre - dans les joints d'étanchéité peuvent contribuer à user la surface de la bille habituellement faite d'acier inoxydable. Ce problème est plus important pour le joint en aval qui supporte toute la pression.

On peut résoudre en partie le problème en utilisant des renforts moins abrasifs comme des fibres de carbone ou d'autres fibres synthétiques ou encore en recouvrant la bille d'un matériau plus dur (ex.: chrome ou nickel).

3.2.4 Effet de la température sur le comportement mécanique

Comme une valve peut être utilisée pour contenir des fluides à des températures extrêmes (-200°C à 250°C et plus), ce facteur doit être étudié avec soin.

3.2.5 Les coûts

Les prix des polymères entrant dans la fabrication des joints d'étanchéité ont certes leur importance. Une recherche, cas par cas, doit être faite en ce sens car la relation entre le prix de la matière première n'est que vaguement reliée au coût du joint fini.

Fluoropolymère (1 de 3)					
Matériau	PTFE	PTFE + 15% verre	PTFE + 10% bronze	PTFE + 5% MoS ₂	CTFE
Nom commercial	Halon G-700	Halon 1015R	Halon 3040R	Halon 2021R	KEL-F81 (TY.6055)
Compagnie	Allied	Allied	Allied	Allied	3M
Procédé	Moul. comp.	Moulage	Moulage	Moulage	Injection
Contr. écou. MPa (psi)					
Contr. rupt. MPa (psi)	28.1 (4000)	23.1 (3300)	23.1 (3300)	31.6 (4500)	40.2 (5720)
All. écou. (%)					
All. rupture (%)	350	340	300	310	150
Mod. tract. MPa (psi)	773 (1.1x10 ⁵)				14500 (2.07x10 ⁶)
Mod. flexion MPa (psi)	913 (1.3x10 ⁵)	1120 (1.6x10 ⁵)	1470 (2.1x10 ⁵)	1120 (1.6x10 ⁵)	1260 (1.8x10 ⁵)
Coefficient de friction	0.02				
Défl. T° (264#/po ²)	48°C 120°F				75°C 167°F
Défl. T° (66#/po ²)	121°C 250°F				125°C 258°F
T° Serv. co.					
Application	gaskets, garnitures, joints				joint pour l'industrie nucléaire ou pour basse temp.
Dureté	D-60(shore)	D-60 (shore)	D-65 (shore)	D-60 (shore)	D-78 (shore)
Abs. d'eau (24 heures)					
Applications					

Contr. écou.: contrainte à l'écoulement (ASTM D-638)
 Contr. rupt.: contrainte à la rupture (ASTM D-638)
 All. écou. : allongement à l'écoulement (ASTM D-638)
 All. rupture: allongement à la rupture (ASTM D-638)
 Mod. tract. : module de traction (ASTM D-638)
 Mod. flexion: module de flexion (ASTM D-790)
 Coefficient de friction: coefficient de friction (aucune norme)
 Défl. T° : température de fléchissement sous charge (ASTM D-648)
 T° Serv. co.: température maximale en service continue (aucune norme)
 Dureté : norme spécifiée dans le tableau
 Abs. d'eau : % d'eau absorbée pendant 24 heures (ASTM D-570)

Tableau 3.4 - Caractéristiques importantes des polymères étudiés

Fluoropolymère (2 de 3)					
Matériau	CTFE + 15% verre	CTFE	ETFE copolymère	FEP 5% MoS ₂	FEP + 20% verre
Nom commercial	KEL-F81	KEL-F81	TEFZEL 200	TEFLON 160	THERMOCOMP
Compagnie	(TY6061) 3M	(TY6065) 3M	E. I. Dupont	E. I. Dupont	(CE1004) LNP
Procédé	Extr./ Inject.	Inj./ Extr.	Extr./ Inj.	Extr./ Inj.	Injection
Contr. écou. MPa (psi)					42.1 (6000)
Contr. rupt. MPa (psi)	30.9 (4400)	40 (5700)	45.6 (6.5x10 ³)	27.6 (3940)	
All. écou. (%)					
All. rupture (%)	35	150	200	300	
Mod. tract. MPa (psi)	1400 (2.0x10 ⁵)	14500 (2.07x10 ⁶)			14500 (2.07x10 ⁶)
Mod. flexion MPa (psi)	2880 (4.1x10 ⁵)	1260 (1.8x10 ⁵)	1400 (2.0x10 ⁵)	815 (1.6x10 ⁵)	5620 (8x10 ⁵)
Coefficient de friction					
Défl. T° (264#/po ²)	126°C 260°F	75°C 167°F	71°C 160°F		176°C 350°F
Défl. T° (66#/po ²)	200°C 392°F	125°C 258°F	104°C 220°F		---
T° Serv. Co.	198°C 390°F			204°C 400°F	
Application	structural parts, valves, diaphragmes	joints pour l'industrie nucléaire ou pour basse tem.	élec- trique	industrie chimique, valves	
Dureté	D-76(shore)	D-78 (shore)	D-75 (shore)	D-55 (shore)	
Abs. d'eau (24 heures)	0.003%		0.030%		0.010%
Applications					

Fluoropolymère (3 de 3)					
Matériau	PFA	PFA + 20% verre	Fluoro- polymère	Fluoro- polymère	Fluoro- polymère
Nom commer- cial	Teflon 340	FP-PF-1004	TORLON	TEFZEL	TEFZEL
Compagnie	OR 350 E.I. Dupont	CNP	4301 AMOCO	200, 280	HT-2004
Procédé	Extru./ Inject.	Injection			
Contr. écou. MPa (psi)	14.7 (2.1×10^3)	33.7 (4.8×10^3)			
Contr. rupt. MPa (psi)	30 (4250)		13.5 (1.96×10^4)	44.8 (6500)	82.7 (12000)
All. écou. (%)					
All. rupture (%)	300		6	200	8
Mod. tract. MPa (psi)				827 (1.2×10^5)	8270 (1.2×10^6)
Mod. flexion MPa (psi)		3510 (5×10^5)	6300 (9.2×10^5)	1378 (2×10^5)	6550 (9.5×10^5)
Coefficient de friction			0.13-0.25	$\mu_D = 0.4$	$\mu_D = \mu_s = 0.3$
Défl. T° ($264\#/po^2$)			274°C 525°F	74°C 165°F	210°C 410°F
Défl. T° ($66\#/po^2$)				104°C 220°F	265°C 510°F
T° Serv. Co.	260°C 500°F		260°C 500°F	150°C 302°F	200°C 392°F
Application	tubes	applications où la tem- pérature excède 200°C			
Dureté	D-60(shore)		14-120 (shore)	R50 (rock) D75(shore)	R74 (rock)
Abs. d'eau (24 heures)	0.030%		0.22%		
Applications					

Polyoléfines (1 de 2)					
Matériau	UHMWPE	UHMWPE 15% verre	PP + 20% PTFE	PP copolymère	PP + 30% verre F. + 15% PTFE
Nom commercial	Tetralene	Nucrel 925	Thermocomp	Shell PP	Thermocomp
Compagnie	Tetrafluor	E.I. Dupont	ML-4040 HS LNP	7328 Shell Chem. Co.	MFL-4036 HS LNP Corp.
Procédé	Extr./ inj.	Extr./ inj.	Injection	Extr./ inj.	
Contr. écou. MPa (psi)		25.3 (3600)		26 (3700)	
Contr. rupt. MPa (psi)	40 (5700)		28.1 (4000)		
All. écou. (%)					
All. rupture (%)	450	520		100 913 (1.3x10 ⁵)	
Mod. tract. MPa (psi)					
Mod. flexion MPa (psi)	527 (7.5x10 ⁴)	77.3 (1.1x10 ⁴)	1190 (1.7x10 ⁵)	1010 (1.45x10 ⁵)	5270 (7.5x10 ⁶)
Coefficient de friction					
Défl. T° (264#/po ²)			54°C 130°F		146°C 295°F
Défl. T° (66#/po ²)	93°C 200°F			93°C 200°F	
T° Serv. Co.					
Application	Roulements	applications générales		applications générales	
Dureté	D-66(shore)	D-50 (shore)		R65 (rockwell)	
Abs. d'eau (24 heures)					
Applications					

Polyoléfines (2 de 2)					
Matériau	UHMWPE				
Nom commercial	GUR UHMWPE				
Compagnie	Hostalen				
Procédé					
Contr. écou. MPa (psi)	21 (3100)				
Contr. rupt. MPa (psi)	42 (6200)				
All. écou. (%)					
All. rupture (%)	450				
Mod. tract. MPa (psi)	1050 (1.5x10 ⁵)				
Mod. flexion MPa (psi)					
Coefficient de friction	$\mu_s=0.15-0.20$ $\mu_D=0.12-0.20$				
Défl. T° (264#/po ²)					
Défl. T° (66#/po ²)					
T° Serv. Co. Application					
Dureté	D62-66 (shore)				
Abs. d'eau (24 heures)					
Applications					

Polyamides (1 de 2)					
Matériau	PA 6/6	PA 6/6 + 20% PTFE	PA 6/12 + 10% verre	PA 6/12 + 20% PTFE	PA 6/12 + 30% verre + 15% PTFE
Nom commercial	Zytel 101	Thermocomp RL 4040 FR	Thermocomp IF-1002	Thermocomp IL-4040	Thermocomp IFL-4036
Compagnie	E.I. Dupont	LNP	LNP	LNP	LNP
Procédé	Injection	Injection	Injection	Injection	Injection
Contr. écou. MPa (psi)	84.3 (1.2x10 ⁴)		84.3 (1.2x10 ⁴)		14.7 (2.1x10 ⁴)
Contr. rupt. MPa (psi)	84.3 (1.2x10 ⁴)	45.6 (6.5x10 ³)		49.2 (7000)	
All. écou. (%)					
All. rupture (%)	60		6		
Mod. tract. MPa (psi)					
Mod. flexion MPa (psi)	2880 (4.1x10 ⁵)	2810 (4x10 ⁵)	5270 (7.5x10 ⁵)	1930 (2.75x10 ⁵)	7380 (1.05x10 ⁶)
Coefficient de friction					
Défl. T° (264#/po ²)	90°C 154°F	190°C 375°F	204°C 400°F	57°C 135°F	207°C 405°F
Défl. T° (66#/po ²)	235°C 455°F		210°C 410°F		
T° Serv. Co.					
Application	applications générales				
Dureté	R-121 (rockwell)		M-87 (rockwell)		
Abs. d'eau (24 heures)	1.2%	1.2%	0.24%	0.30%	0.15%
Applications					

Polyamides (2 de 2)					
Matériau	PA 6/12 + 45% verre + PTFE	PA 6/12 + 30% verre + PTFE	PA 6/12 + MbS2	PA (?)	
Nom commer- cial	RTP/205	N6-30 FG- 0214	Nylatron GS-73	Nylatron GS	
Compagnie	RTP	Thermofil. Inc.	Polymer Corp.	Amoco	
Procédé	Injection		Injection		
Contr. écou. MPa (psi)	133 (1.90x10 ⁴)	137 (1.55x10 ⁴)			
Contr. rupt. MPa (psi)			65.3 (9.3x10 ³)	82.7 (1.2x10 ⁴)	
All. écou. (%)	2	2			
All. rupture (%)			67		
Mod. tract. MPa (psi)	8430 (1.20x10 ⁶)	8430 (1.2x10 ⁶)	2130 (3.04x10 ⁵)	3600 (5.25x10 ⁵)	
Mod. flexion MPa (psi)	7730 (1.1x10 ⁶)	7870 (1.12x10 ⁶)	2610 (3.72x10 ⁵)	3100 (4.5x10 ⁵)	
Coefficient de friction		Stat. 0.24 Dynam. 0.30		$\mu_D = (0.15-0.35)$	
Défl. T° (264#/po ²)	215°C 420°F	215°C 420°F	82°C 180°F	200-470°C 90-240°F	
Défl. T° (66#/po ²)	218°C 425°F	218°C 425°F		400-490°C 200-250°F	
T° Serv. Co.				180-200°C 80-90°F	
Application					
Dureté	R-118 (rockwell)	R-118 (rockwell)	R-114 (rockwell)	R-110-125 D-80-90	
Abs. d'eau (24 heures)	0.20%	0.20%	0.26%	(0.5-1.4)%	
Applications					

Polyoxyméthylènes (1 de 1)					
Matériau	POM	POM + 21% PTFE	POM copolymère		
Nom commercial	Delrin	Delrin	Celcon		
Compagnie	510 AF	500 Af	W90		
	E.I.	E.I.			
	Dupont	Dupont			
Procédé	Extr./inj.	Extr./inj.	Injection		
Contr. écou.	59.6	48.5	61		
MPa (psi)	(8490)	(6900)	(8800)		
Contr. rupt.	59.7				
MPa (psi)	(8500)				
All. écou.					
(%)					
All. rupture					
(%)	15	15	60		
Mod. tract.	3060	2950	2820		
MPa (psi)	(4.36x10 ⁵)	(4.2x10 ⁵)	(4.1x10 ⁵)		
Mod. flexion	3000	2460	2580		
MPa (psi)	(4.27x10 ⁵)	(3.5x10 ⁵)	(3.75x10 ⁵)		
Coefficient de friction			Dynam.=0.15		
Défl. T°	126°C	100°C	110°C		
(264#/po ²)	260°F	212°F	230°F		
Défl. T°	170°C	165°C	158°C		
(66#/po ²)	338°F	329°F	316°F		
T° Serv. Co.					
Application	applications	roule-			
	générales	ments			
Dureté	M-86(rock)	M-78(rock)	M-80(rock)		
Abs. d'eau					
(24 heures)	0.20%	0.20%	0.22%		
Applications					

Polyimides (1 de 1)					
Matériau	Polyimide + ?	Polymimide + 20% graph + 30% PTFE	Polyimide + PTFE	Polymimide + 30% graph + PTFE	
Nom commercial	Torlon 4000T	Torlon 4275	Kinel 5518	W-30NF-0214	
Compagnie	Amoco Chem. Corp.	Amoco Chem. Corp.	Rhone Poulenc	Thermofil Inc.	
Procédé	Compr/extr.	Injection	Compr/extr.		
Contr. écou. MPa (psi)					
Contr. rupt. MPa (psi)	119 (1.7x10 ⁴)	127 (1.81x10 ⁴)	35 (5000)		
All. écou. (%)					
All. rupture (%)	10	6	1		
Mod. tract. MPa (psi)					
Mod. flexion MPa (psi)	3650 (5.2x10 ⁵)	7310 (1.04x10 ⁶)	2740 (3.9x10 ⁵)	1.96x10 ⁴ (2.8x10 ⁶)	
Coefficient de friction				stat. 0.15 dynam. 0.22	
Défl. T° (264#/po ²)	260°C 500°F	266°C 512°F	287°C 550°F	210°C 410°F	
Défl. T° (66#/po ²)					
T° Serv. Co.				170°C 338°F	
Application	roulements	roulements, cylindres	roule- ments		
Dureté	E-78 (rockwell)		M-115 (rockwell)	M-125 (rockwell)	
Abs. d'eau (24 heures)		0.19%	0.30%	0.17%	
Applications					

PPS (1 de 1)					
Matériau	PPS + PTFE	PPS + 30% carbone + 15% PTFE	PPS + fibres de verre	PPS + PTFE + 30% fibres de verre	
Nom commer- cial	IPC-5100 (Altom)	Thermocomp OCL-4036	Ryton A-100	T-30-FG- 0214	
Compagnie	I.P.C.	LNP Corp.	Phillips Chem. Co.	Thermofil	
Procédé	Inj/compr	Injection	Injection	Injection	
Contr. écou. MPa (psi)					
Contr. rupt. MPa (psi)		179 (2.55x10 ⁴)		133 (1.90x10 ⁴)	
All. écou. (%)					
All. rupture (%)				3	
Mod. tract. MPa (psi)				1.12x10 ⁴ (1.6x10 ⁶)	
Mod. flexion MPa (psi)	632 (9x10 ⁴)	1.4x10 ⁴ (2x10 ⁶)	175 (2.5x10 ⁴)	1.05x10 ⁴ (1.5x10 ⁶)	
Coefficient de friction	0.09				
Défl. T° (264#/po ²)		260°C 500°F	200°C 500°F	260°C 500°F	
Défl. T° (66#/po ²)					
T° Serv. Co.	260°C 500°F				
Application			composantes structurales, joints d'étanchéité		
Dureté	D-69(shore)		R-116 (rockwell)	R-120 (rockwell)	
Abs. d'eau (24 heures)		0.030%		0.020%	
Applications					

Polyéther ether ketone (Peek) + polyéther sulfone					
Matériau	Peek + 10% fibres de verre	Peek + 30% fibres de carbone		Polyether sulf. + 30%	
Nom commer- cial	RTP 2201	Electrafil J-1105/CF/ 30		GF + PTFE K-30FG- 0214	
Compagnie	RTP	Wilson- fiberfil		Thermofil	
Procédé	Injection	Injection			
Contr. écou. MPa (psi)	126 (1.8x10 ⁴)			127 (1.82x10 ⁴)	
Contr. rupt. MPa (psi)		260 (3.7x10 ⁴)			
All. écou. (%)	4			4	
All. rupture (%)		1			
Mod. tract. MPa (psi)	8430 (1.2x10 ⁶)	2.46x10 ⁴ (3.5x10 ⁶)		8430 (1.2x10 ⁶)	
Mod. flexion MPa (psi)	5340 (7.6x10 ⁵)	2.01x10 ⁴ (2.87x10 ⁶)		8080 (1.15x10 ⁶)	
Coefficient de friction				stat. 0.15 dynam. 0.19	
Défl. T° (264#/po ²)	215°C 420°F	321°C 610°F		210°C 410°F	
Défl. T° (66#/po ²)				215°C 420°F	
T° Serv. Co. Application					
Dureté				M-97 (rockwell)	
Abs. d'eau (24 heures)	0.18%	0.06%		0.30%	
Applications					

CHAPITRE IV

EXPÉRIENCES SUR LES JOINTS D'ÉTANCHÉITÉ

Plusieurs expériences ont été effectuées sur des joints d'étanchéité d'une valve de la série SB 300, 2", afin d'évaluer expérimentalement leur comportement mécanique lorsque la valve est soumise à une pression. Ce modèle de valve a été choisi parce qu'il est couramment utilisé dans l'industrie et qu'il est représentatif des produits fabriqués par Velan. De ce cas particulier, des conclusions générales sur la gamme des produits Velan seront formulées.

4.1 MONTAGE EXPÉRIMENTAL

Une valve a été modifiée afin de pouvoir mesurer les déformations du joint d'étanchéité pendant un test. Le montage et la méthode sont développés en vue d'un transfert technologique chez Velan. Des capteurs de déplacement ont été installés pour un enregistrement en continu de la position axiale de la bille (Y) et de la position de l'arrière du joint d'étanchéité (X). Un capteur de pression a été installé à l'entrée de la valve. La figure 4.1 montre l'emplacement des capteurs de déplacement.

Une carte de conversion analogue/digitale est installée dans un micro-ordinateur "Apple". Ceci permet de lire les

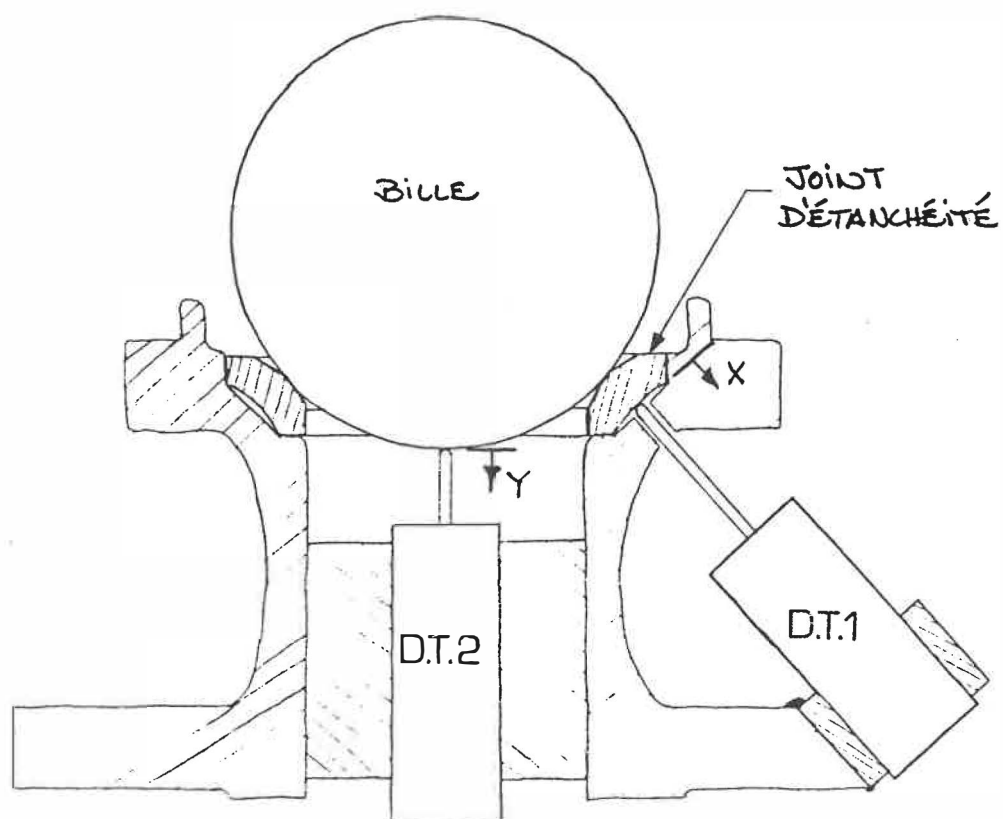


Figure 4.1 - Coupe transversale de la portion inférieure de la valve

voltages qui proviennent des trois capteurs décrits précédemment et de traiter ultérieurement les résultats à l'aide de programmes conçus à cet effet.

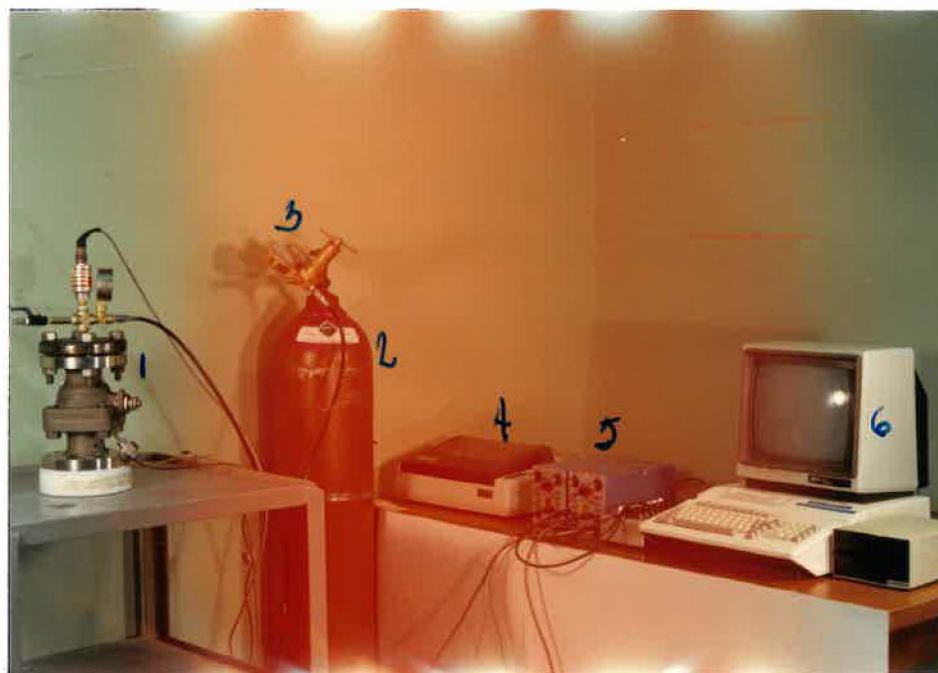
Le micro-ordinateur est utilisé pour des fins de calibration, d'emmagasinement de données et de représentations graphiques des résultats. Le montage expérimental est montré à la figure 4.2.

4.2 PROGRAMMES DÉDIÉS

Ces programmes ont été écrits en langage "BASIC". Leur fonction est d'ajuster et d'enregistrer les signaux électriques des trois capteurs et de produire des graphiques en temps réels à l'écran. Les imprimés des trois programmes sont reproduits à l'annexe D.

4.2.1 Programme de calibration

La caractéristique principale de ce programme est de lire et d'afficher continuellement à l'écran les voltages en provenance des capteurs. Ce programme sert à calibrer ces capteurs et aussi à ajuster leurs voltages initiaux avant un test. Un organigramme du programme est reproduit à la figure 4.3.



- 1 - valve expérimentale (SB 300, 2")
- 2 - bouteille d'azote
- 3 - régulateur de pression
- 4 - imprimante
- 5 - amplificateurs de voltage
- 6 - ordinateur

Figure 4.2 - Montage expérimental

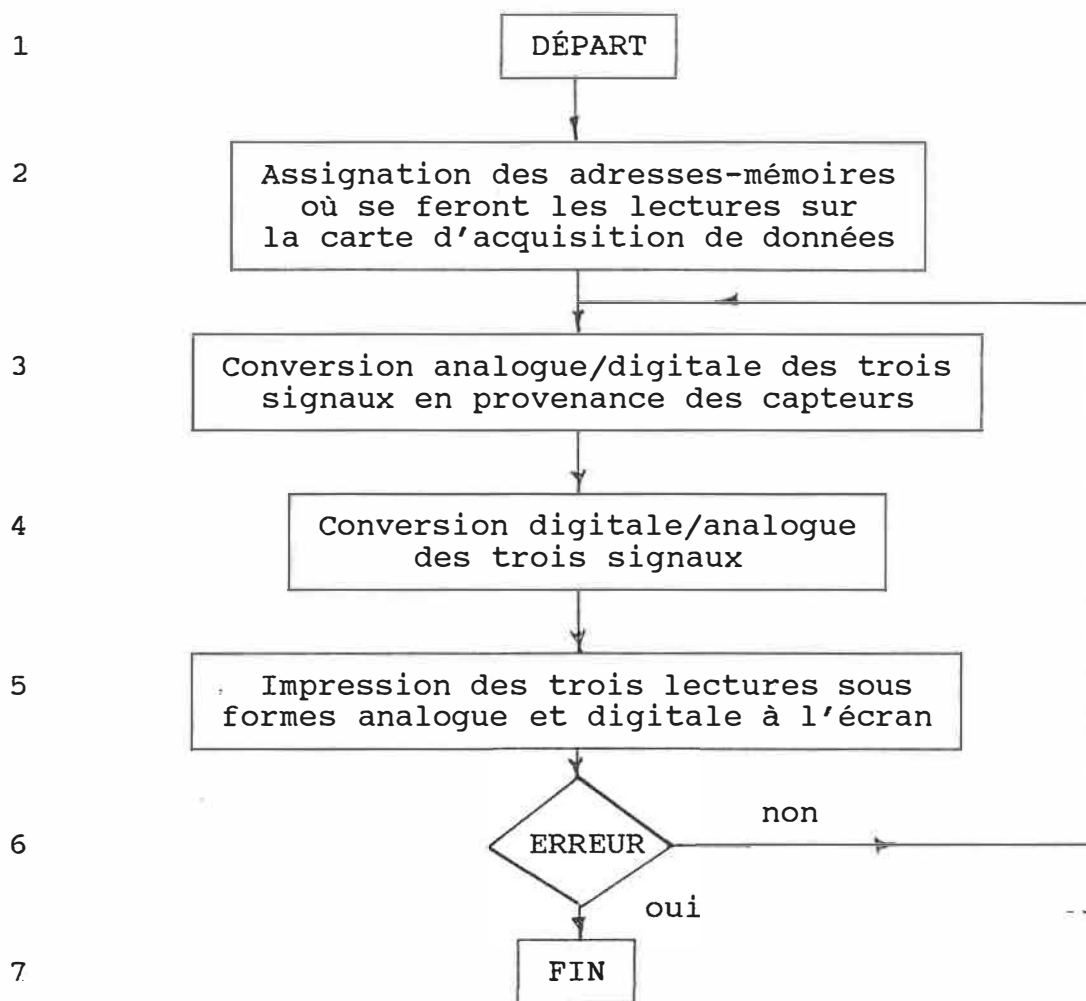


Figure 4.3 - Organigramme du programme de calibration

4.2.2 Programme d'acquisition et d'emmagasiner de données

Le but de ce programme est de lire et d'emmagasiner les voltages en provenance des capteurs pendant une expérience.

Les variables suivantes peuvent être changées en fonction de différentes procédures expérimentales.

NN : nombre de données à être emmagasinées par capteur

F1 : paramètre contrôlant la fréquence d'acquisition

F(): facteur de calibration des capteurs (10^{-3} mm/volt ou MPa/volt)

Un organigramme du programme est reproduit à la figure 4.4.

4.2.3 Programme de représentation graphique

Ce programme est destiné à produire des graphiques dans leur forme finale. Une sous-routine nommée "AMPERGRAPH" a été utilisée pour la création de ces graphiques.

Les options suivantes sont offertes à l'utilisateur du programme:

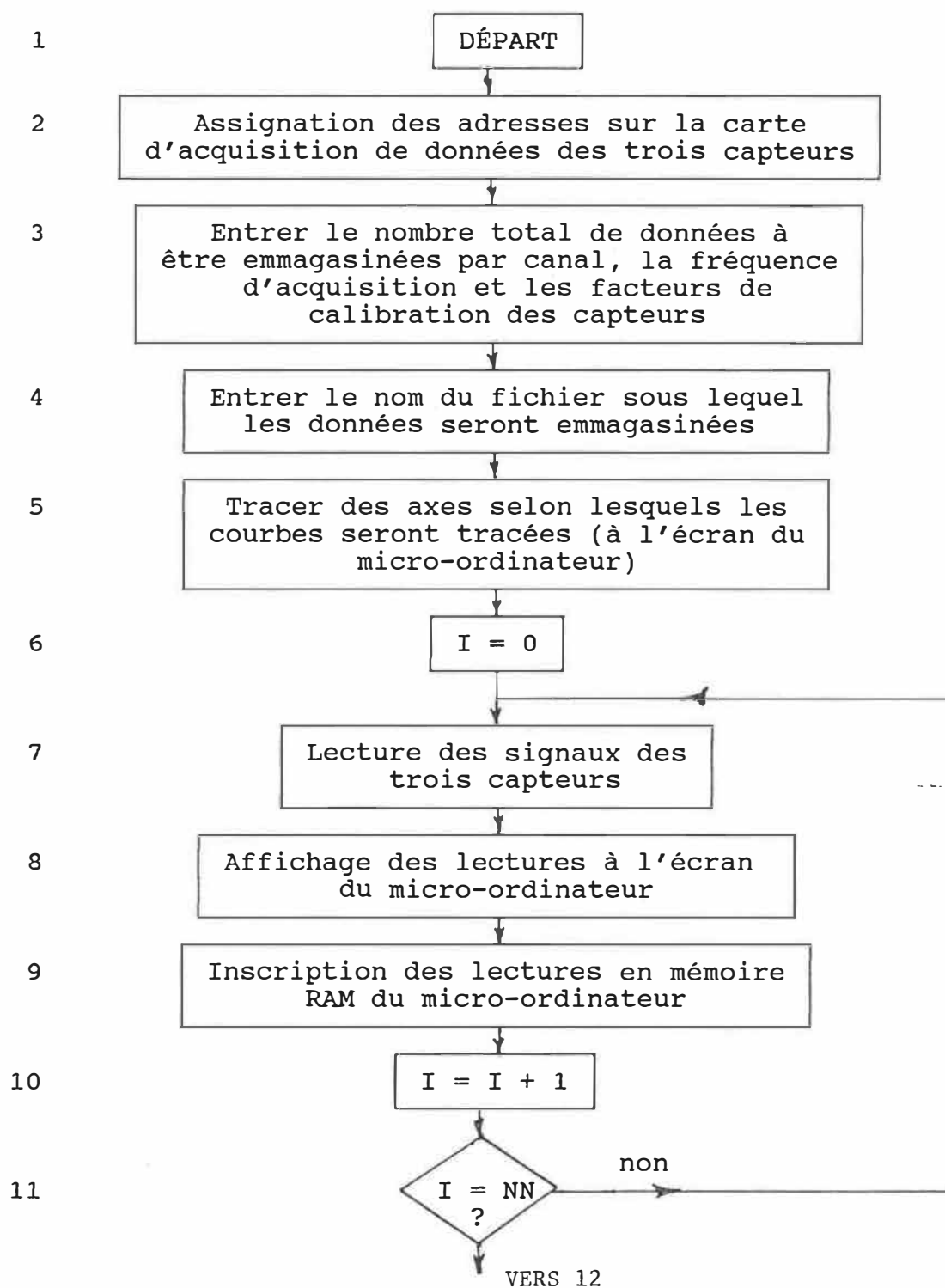


Figure 4.4 - Organigramme du programme d'acquisition et d'emmagasinage des données

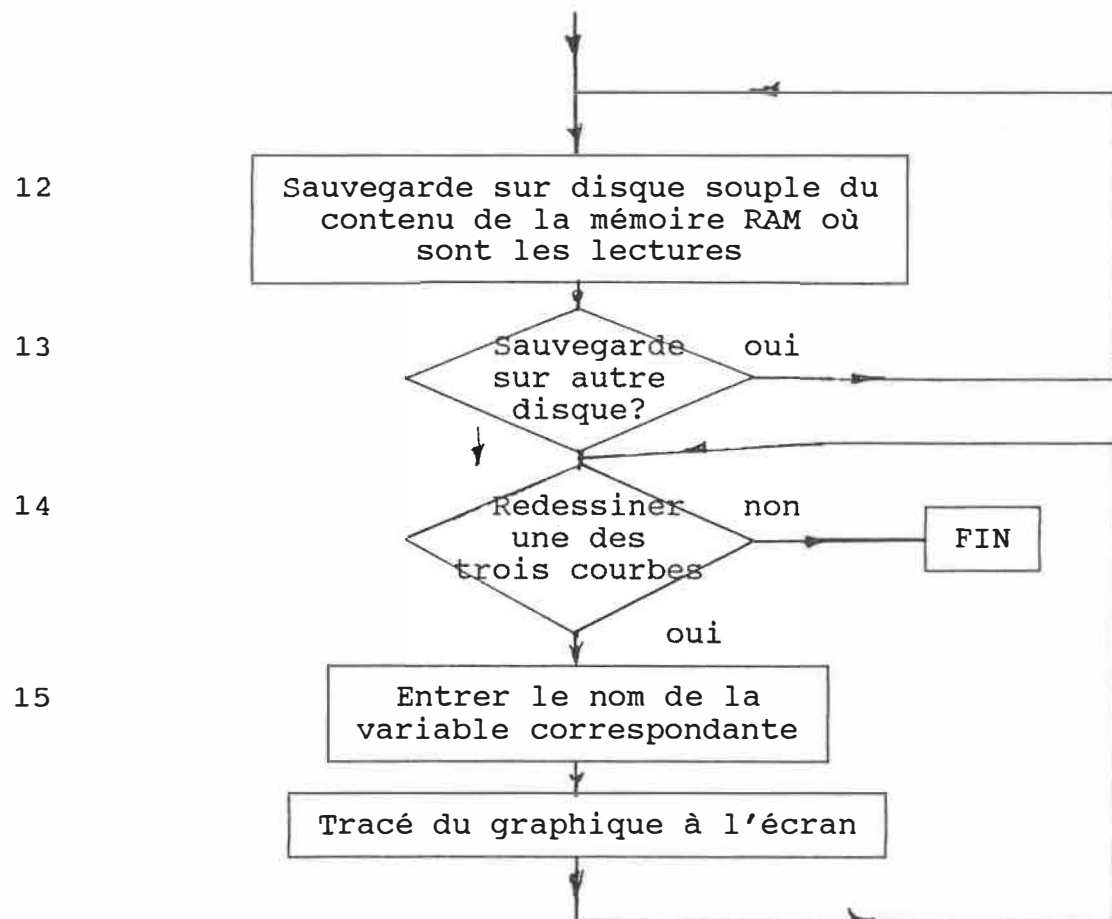


Figure 4.4 - Organigramme du programme d'acquisition et d'emmagasinement des données (suite)

- 1) voir la courbe entièrement ou préciser la région du graphique à traiter;
- 2) choisir entre axe du temps logarithmique ou linéaire;
- 3) imprimer le graphique;
- 4) imprimer toutes les données expérimentales.

Un organigramme du programme est reproduit à la figure 4.5.

4.3 DESCRIPTION DES JOINTS D'ÉTANCHÉITÉ TESTÉS

Les joints d'étanchéité qui ont été soumis aux tests étaient faits de UHMWPE, de PTFE et de PTFE renforcé de 15% de fibres de verre.

Les joints d'étanchéité en PTFE sont usinés à partir de tubes faits par moulage-compression suivi d'un recuit. Les joints d'étanchéité en UHMWPE sont usinés à partir de tubes extrudés. Les dimensions et les tolérances du joint d'étanchéité sur lequel les expériences ont été faites se retrouvent à la figure 4.6.

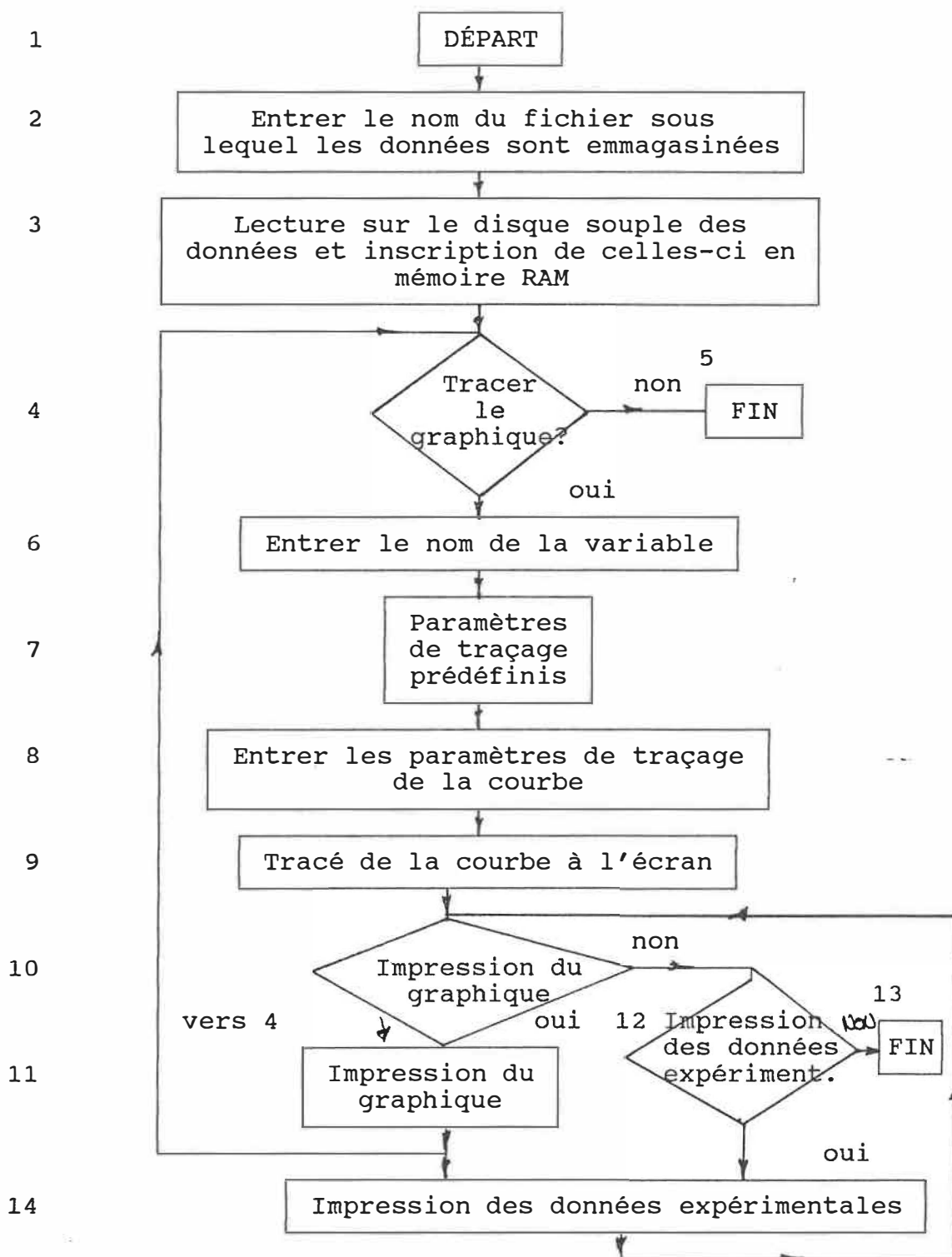


Figure 4.5 - Organigramme du programme de représentation graphique

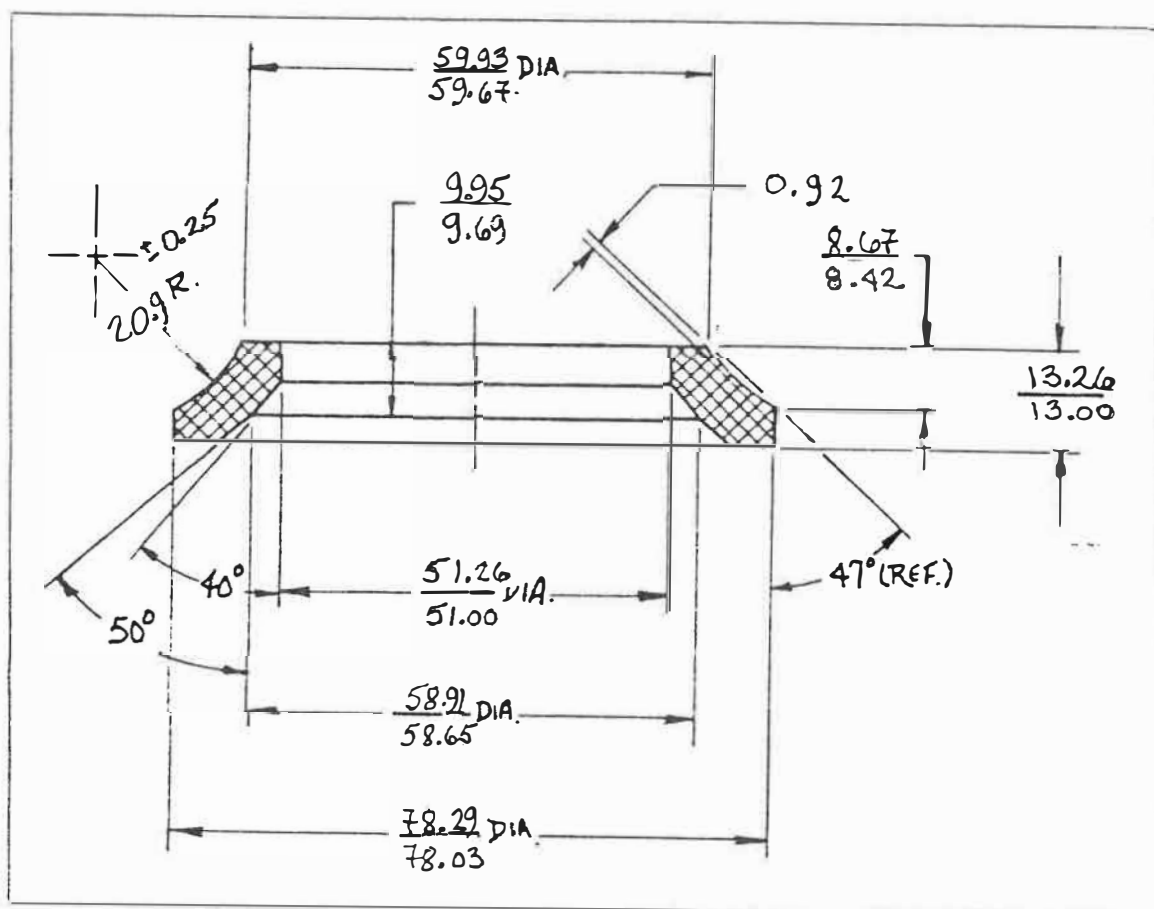


Figure 4.6 - Dimensions des joints d'étanchéité usinés pour une valve de type SB 300, 2"; toutes les dimensions sont en mm

4.4 MESURES SUR LE JOINT D'ÉTANCHÉITÉ

Plusieurs mesures sont prises avant et/ou après chaque test. Elles correspondent aux variables suivantes (voir aussi la figure 4.7):

- A,A': la largeur du joint d'étanchéité avant et après chaque test;
- B,B': l'épaisseur du joint d'étanchéité avant et après chaque test;
- C : la largeur de la bande de contact entre le joint d'étanchéité et la bille lorsque la valve est sous pression;
- D : la distance entre l'arrière du joint d'étanchéité et le boîtier de la valve.

La largeur de la bande de contact entre le joint d'étanchéité et la bille, C, est déterminée en appliquant quatre marques symétriques sur la bille avant chaque test. Ces marques laissent des empreintes sur le joint d'étanchéité qui peuvent être mesurées après le test.

La distance entre l'arrière du joint d'étanchéité et le boîtier de la valve, D, est mesurée en utilisant le capteur de déplacement DT1. La procédure suivante s'applique (figure 4.8):

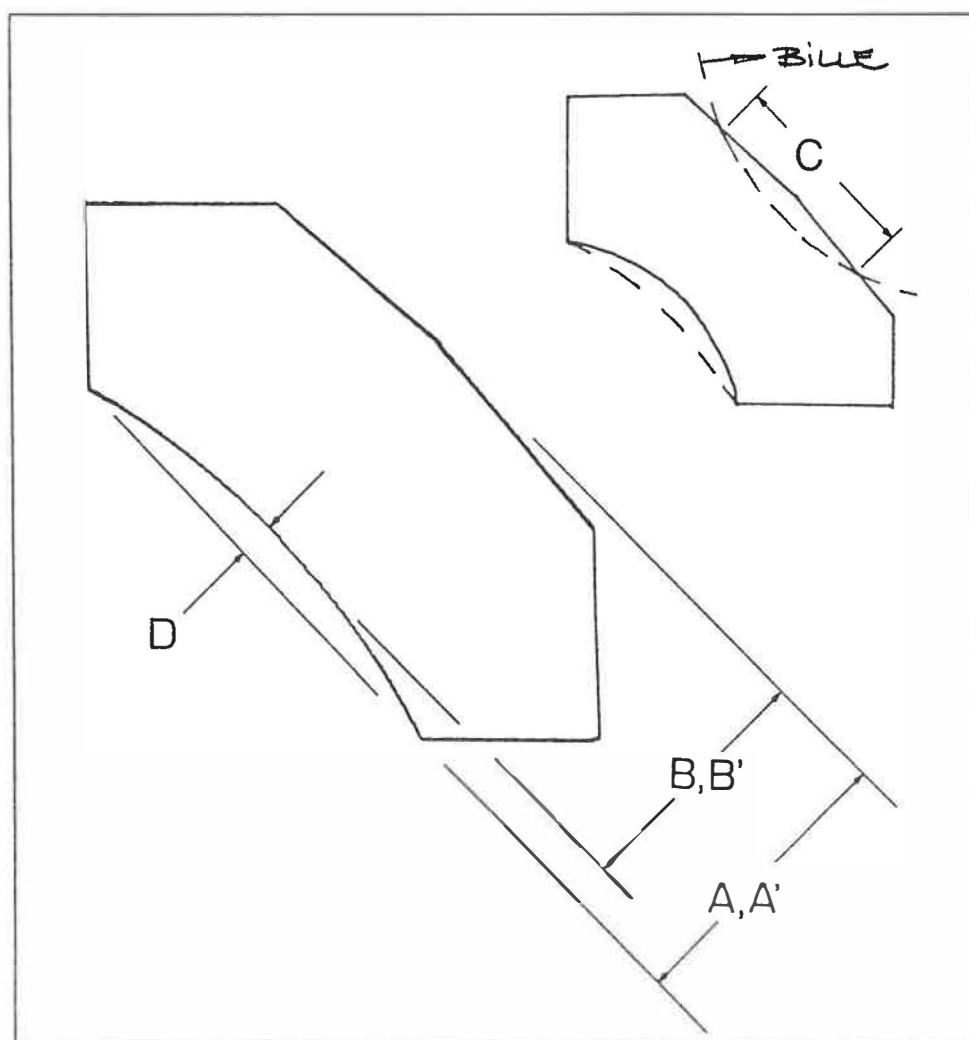
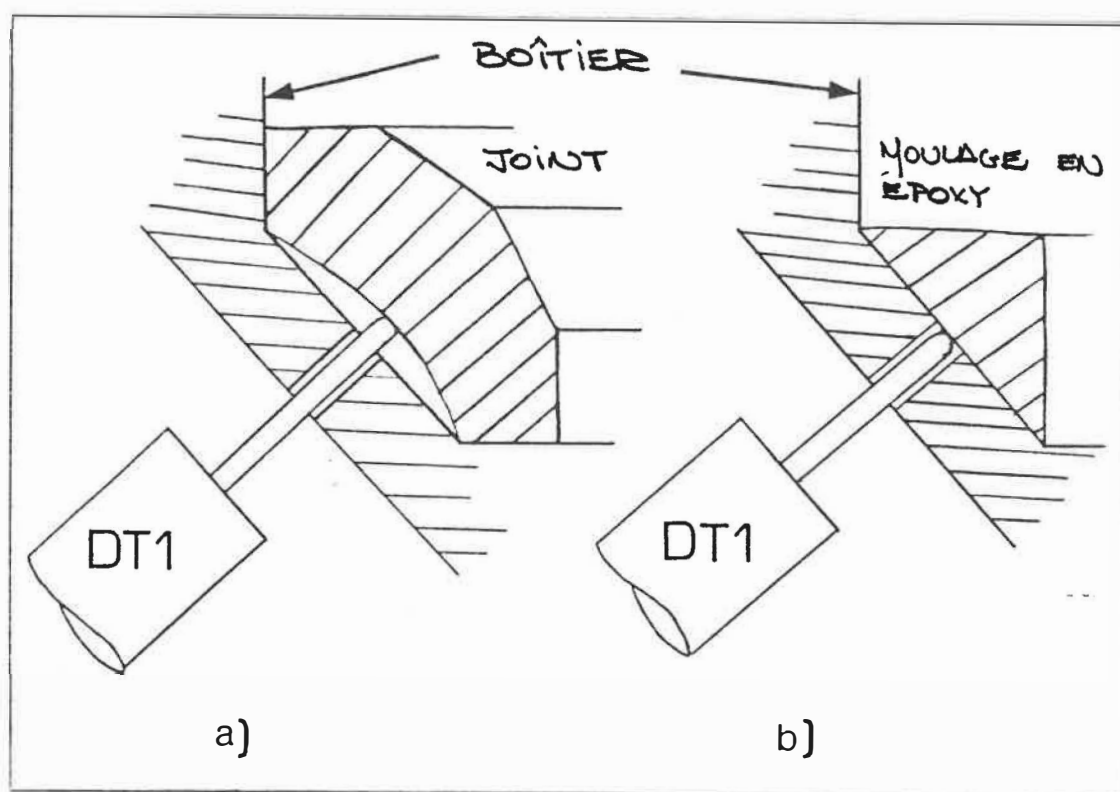


Figure 4.7 - Coupe transversale d'un joint d'étanchéité;
mesures prises avant et/ou après chaque test



a) joint d'étanchéité en place dans la valve

b) joint d'étanchéité remplacé par un moulage en époxy

Figure 4.8 - Technique utilisée pour mesurer la distance entre l'arrière du joint d'étanchéité et le boîtier de la valve

- 1) le joint d'étanchéité est mis en place dans la valve avec la bille au-dessus;
- 2) le voltage initial, V_o , est ajusté à -5 volts en déplaçant le capteur;
- 3) le joint d'étanchéité est alors remplacé par un moulage en époxy qui épouse parfaitement le boîtier de la valve;
- 4) le voltage final, V_F , est lu;
- 5) calcul de la distance, D , qui est fonction de $(V_F - V_o)$;
- 6) le joint d'étanchéité est remis en place, prêt à être testé.

4.5 TESTS

Plusieurs tests ont été faits sur ces joints d'étanchéité afin de déterminer leur comportement mécanique et pour recueillir des données aux fins d'une modélisation mathématique. Ces tests se subdivisent en deux catégories, comme on le voit à la figure 4.9.

La première série consiste essentiellement à faire des tests de courte durée à la pression maximale de la valve, 5.5 MPa et à une pression intermédiaire, 2.1 MPa. Ces tests sont faits pour comparer le comportement mécanique de nouveaux joints d'étanchéité.

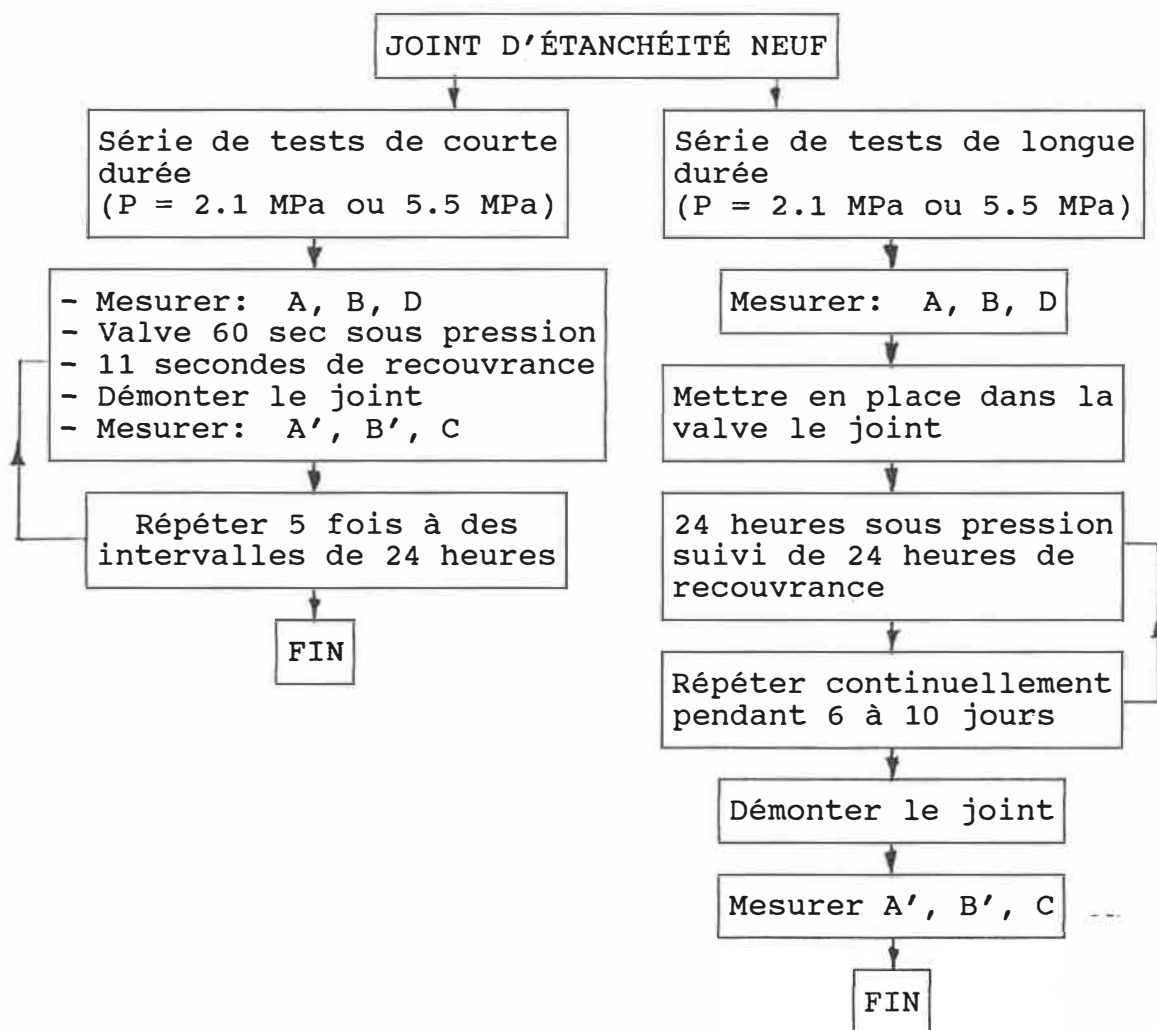


Figure 4.9 - Tests faits sur les joints d'étanchéité

La deuxième série consiste en des tests de longue durée aux deux mêmes pressions que celles mentionnées précédemment. Ces tests sont faits pour simuler les effets d'une valve qui est opérée sous ces pressions pendant de longues périodes de temps.

4.5.1 Tests de courte durée

La première série de tests a été réalisée avec des joints d'étanchéité jamais utilisés auparavant. Chaque joint d'étanchéité fut testé une fois par jour pendant cinq jours consécutifs. Les mesures appropriées ont été faites avant et après chaque test. Les résultats expérimentaux sont regroupés à l'annexe E. Un seul joint de chaque matériau a été testé pour chacune des conditions.

Le test consiste à appliquer 5.5 MPa ou 2.1 MPa pendant soixante secondes; la pression est ensuite relâchée pendant les prochaines onze secondes. Le joint d'étanchéité est ensuite enlevé de la valve et peut récupérer pendant les prochaines vingt-quatre heures, soit jusqu'au prochain test. La figure 4.10 montre des graphiques typiques pour chacune des variables mesurées.

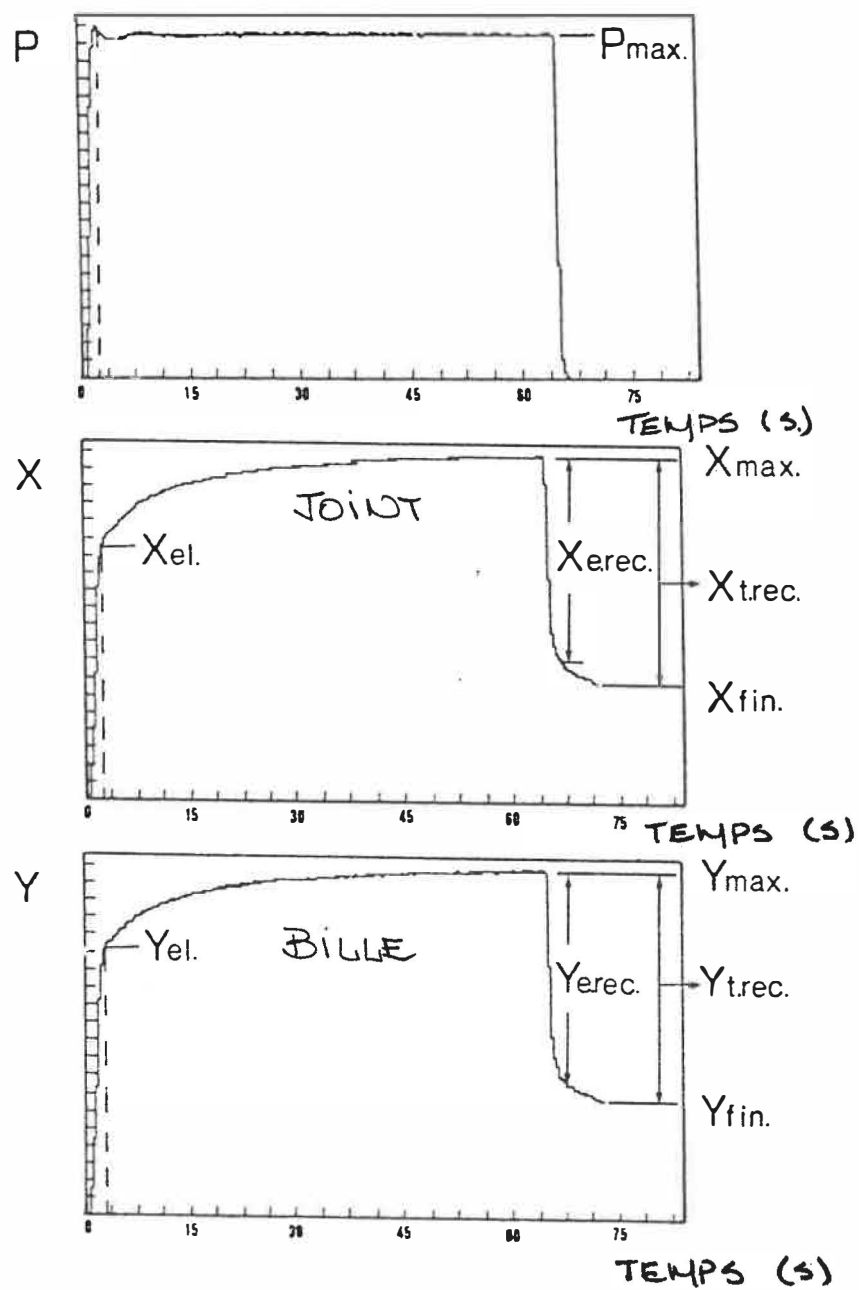


Figure 4.10 - Représentation typique de données brutes pour les trois variables d'un test de courte durée

Plusieurs paramètres sont étudiés à chaque expérience. Ils sont décrits au tableau 4.1 et sont aussi représentés aux figures 4.10 à 4.12.

Le taux d'augmentation de la pression (les premières 1.5 secondes du test), $\Delta P/\Delta t$, tout comme les deux déplacements correspondants, X sur Y, sont présentés pour le premier stade des tests à court terme à 2.1 MPa et 5.5 MPa aux figures 4.11 et 4.12 respectivement. Les courbes obtenues dans un test fait à 2.1 MPa montrent un comportement linéaire (coefficient de régression > 0.99).

Quoique le taux d'augmentation de la pression, $\Delta P/\Delta t$, soit aussi linéaire pour les tests exécutés à 5.5 MPa (figure 4.12), les déplacements montrent un comportement non linéaire. Cela s'explique par le fait que l'arrière du joint d'étanchéité fait contact avec le corps de la valve avant que P_{max} ne soit atteint. La distance, D, à laquelle l'arrière du joint d'étanchéité fait contact avec le boîtier de la valve (voir section 4.4) est rapportée à la figure 4.12. Tout autre déplacement enregistré quand $X > D$ correspond à une extrusion locale du matériau à travers la cavité par laquelle la tige du capteur passe et n'a aucun intérêt.

P	: pression appliquée dans la valve
X	: déplacement de l'arrière du joint d'étanchéité mesuré par le capteur de déplacement #1
Y	: déplacement de la bille mesurée par le capteur de déplacement #2
Pmax	: pression maximale pendant un test (figure 4.10)
Xel	: déplacement élastique du joint d'étanchéité si Pmax est recherchée (figure 4.11)
Yel	: déplacement de la bille correspondant à Xel (figure 4.10)
Xmax	: déplacement maximal du joint d'étanchéité après 60 secondes sous pression (figure 4.10)
Ymax	: déplacement maximal de la bille après 60 secondes sous pression (figure 4.10)
Xe.rec	: recouvrement élastique du joint d'étanchéité quand la pression est relâchée (figure 4.10)
Ye.rec	: recouvrement élastique du joint d'étanchéité tel que mesuré par le trajet de la bille quand la pression est relâchée (figure 4.11)
Xt.rec	: recouvrement total (élastique + viscoélastique) du joint d'étanchéité à la fin du test (figure 4.10)
Yt.rec	: recouvrement total (élastique + viscoélastique) du joint d'étanchéité tel que mesuré lors du trajet de la bille (figure 4.10)
Xfin	: position de l'arrière du joint d'étanchéité à la fin du test (figure 4.10)
Yfin	: position de la bille à la fin du test (figure 4.10)
$\% \text{ Xt.rec}$	: pourcentage de recouvrement du joint d'étanchéité
$\frac{\text{Xmax}}{\% \text{ Yt.rec}}$	: pourcentage de recouvrement du joint d'étanchéité tel que mesuré lors du trajet de la bille
$\Delta P/\Delta t$	: taux d'augmentation dans la pression (figures 4.11 et 4.12)
$\Delta X/\Delta t$	: vitesse à laquelle l'arrière du joint d'étanchéité se déforme lorsque la pression est appliquée (figure 4.11)
$\Delta Y/\Delta t$	: vitesse à laquelle la bille se déplace quand la pression est appliquée (figure 4.11)
$\Delta P/\Delta X$	: rigidité du joint d'étanchéité établie par la portion linéaire d'un graphique P vs X (figure 4.13)

Tableau 4.1 - Paramètres étudiés dans les tests à court terme

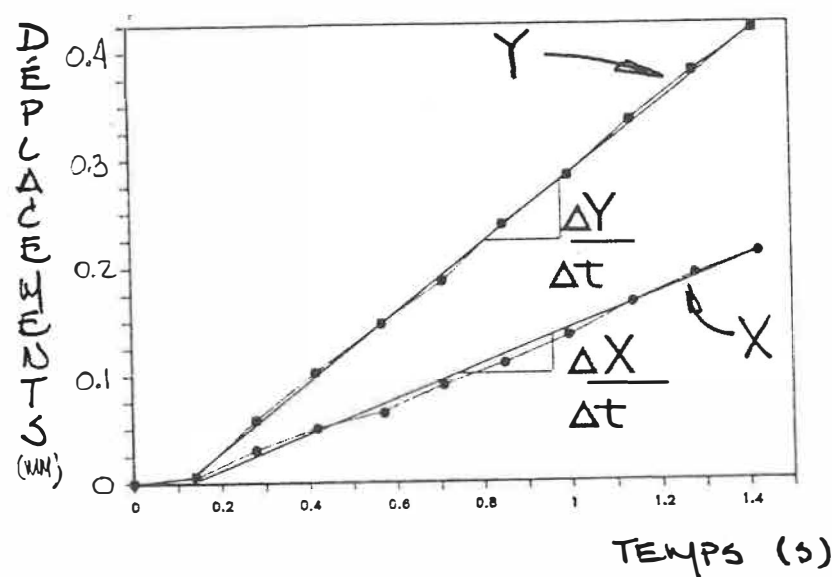
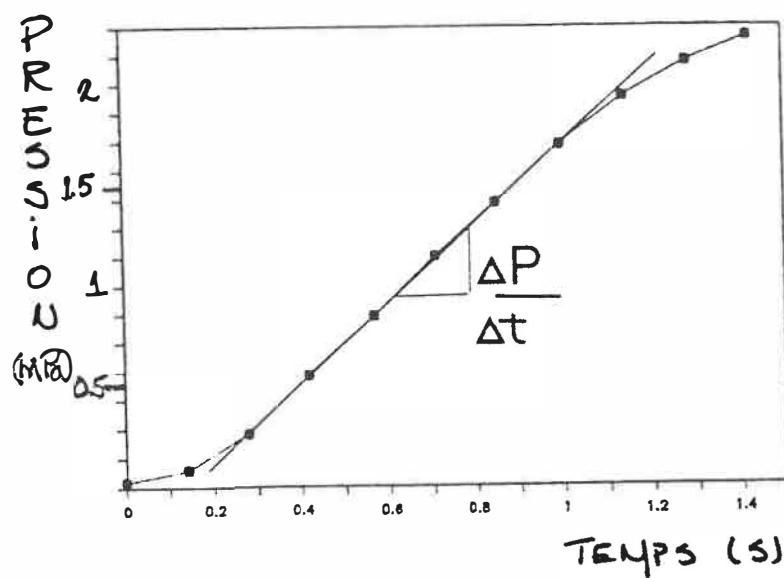


Figure 4.11 a) Pression en fonction du temps dans les premiers instants des expériences sur les joints d'étanchéité, à 2.1 MPa

b) Déplacements correspondants de la bille et de la partie arrière du joint d'étanchéité en fonction du temps

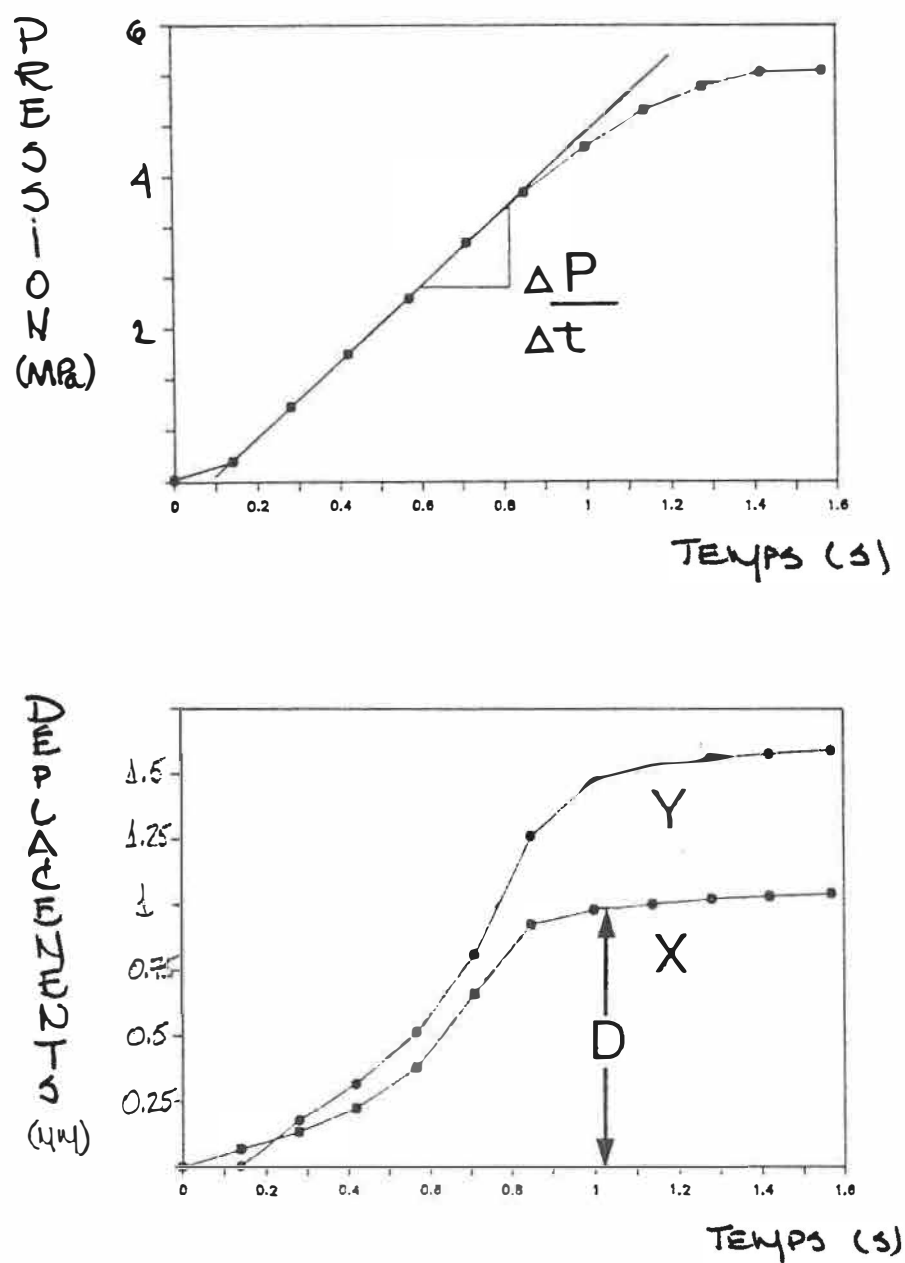


Figure 4.12 a) Pression en fonction du temps dans le stade initial des expériences sur les joints d'étanchéité, à 5.5 MPa

b) Déplacements correspondants de la bille et de la partie arrière du joint d'étanchéité en fonction du temps

Une constante de rigidité du joint peut donc être déduite de ces tests. Elle correspond à la pente de la courbe pression en fonction du déplacement du joint, X , reproduite à la figure 4.13. Cette constante, pour un joint neuf, est de 14.5 (MPa/mm) pour le UHMWPE, de 9.4 (MPa/mm) pour le PTFE et de 11.2 (MPa/mm) pour le PTFE renforcé par 15 % de verre.

Au fil des expériences, le joint d'étanchéité a subi des changements de dimension et de comportement mécanique. Plusieurs courbes illustrent ces changements (figures 4.14 et 4.15).

Les joints d'étanchéité testés à 5.5 MPa ont été beaucoup plus déformés que ceux testés à 2.1 MPa (figure 4.15). Notons que les meilleures performances, de ce point de vue, reviennent au joint d'étanchéité en UHMWPE. Ce joint d'étanchéité a aussi conservé, dans une plus large mesure, ses propriétés mécaniques.

De ceci ressortent les propriétés mécaniques importantes que doivent avoir un matériau servant de joint d'étanchéité; c'est-à-dire de hauts modules de traction et de compression (pour éviter le contact de la partie arquée du joint d'étanchéité avec le boîtier) et une haute contrainte

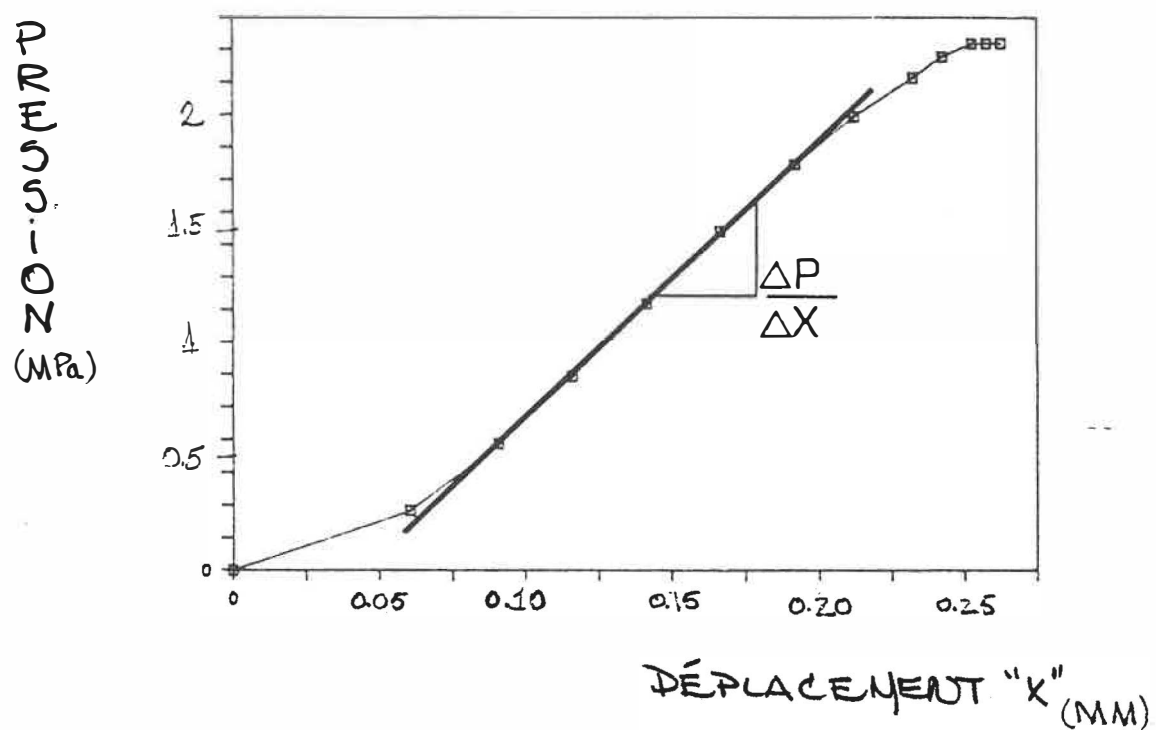


Figure 4.13 - Pression en fonction de la distance parcourue de la partie arrière du joint établissant la rigidité du joint d'étanchéité

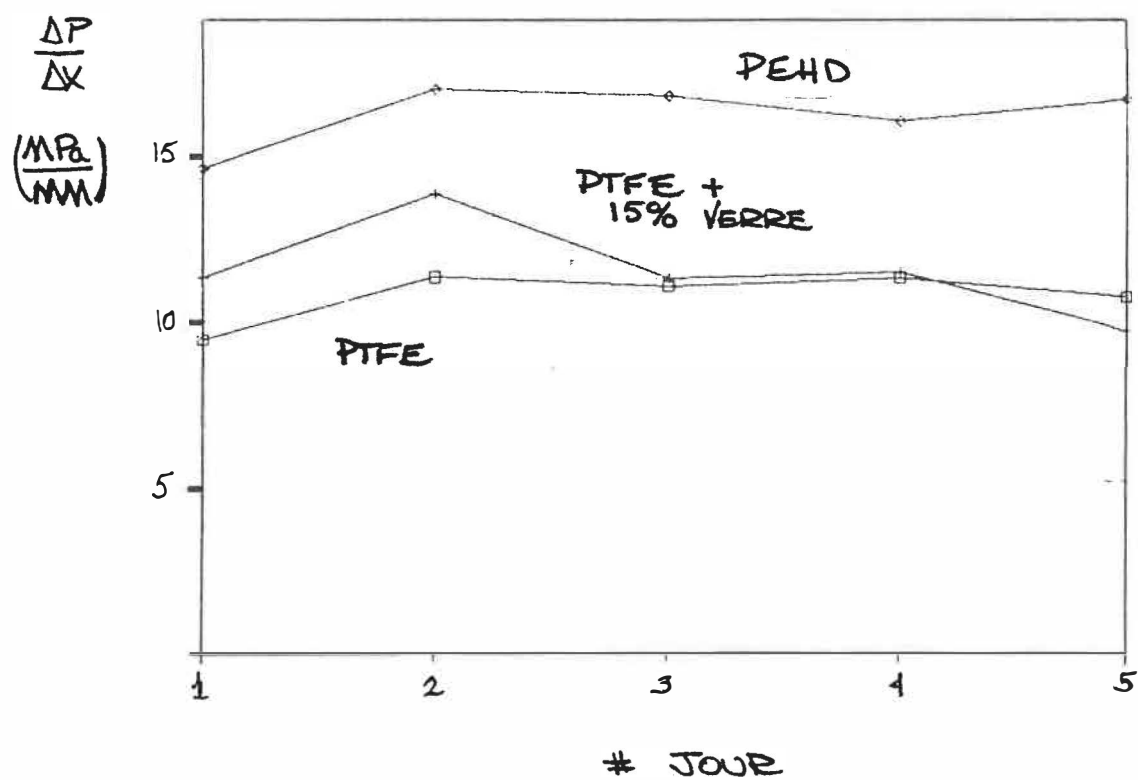


Figure 4.14 - Constante de rigidité des joints d'étanchéité
en fonction de la journée du test
($p = 2.1$ MPa)

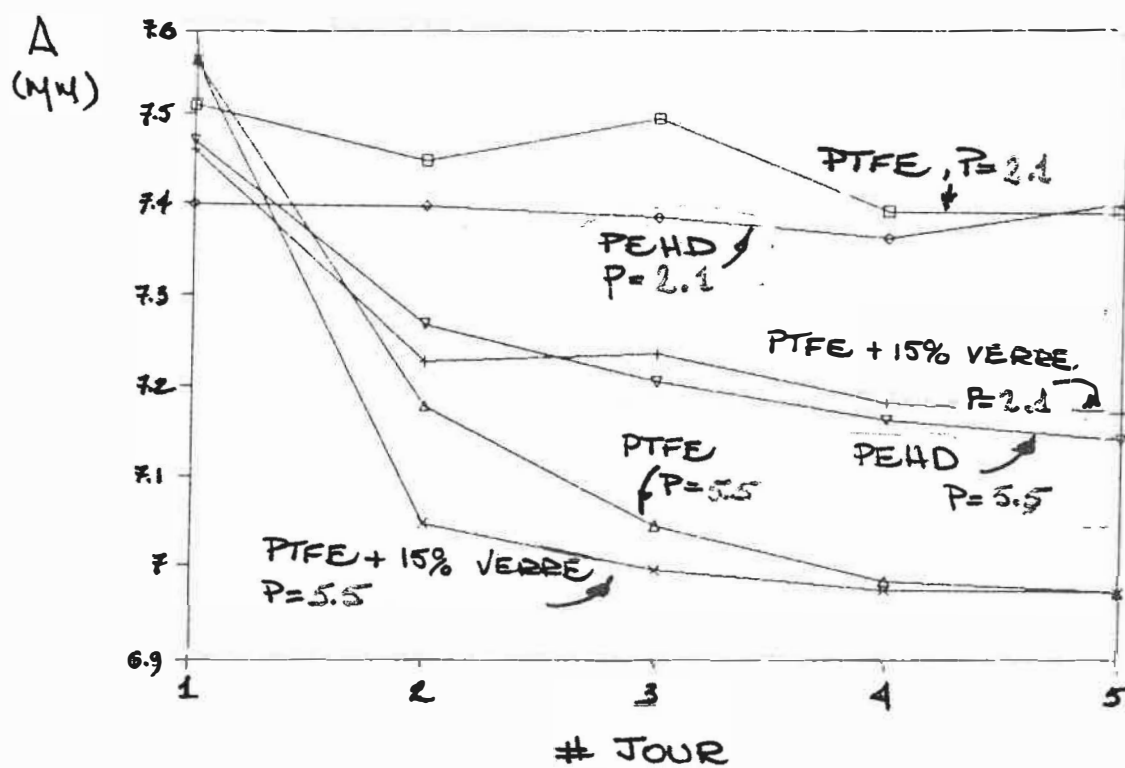


Figure 4.15 - Largeur du joint d'étanchéité, A , au début d'un test, en fonction de la journée du test

à l'écoulement (pour éviter les déformations plastiques du joint d'étanchéité).

Tel que le montre la figure 4.15, le joint d'étanchéité en PTFE renforcé de verre est celui qui reste le plus déformé à la suite d'un test. C'est aussi le matériau ayant la plus faible contrainte à l'écoulement.

4.5.2 Tests de longue durée

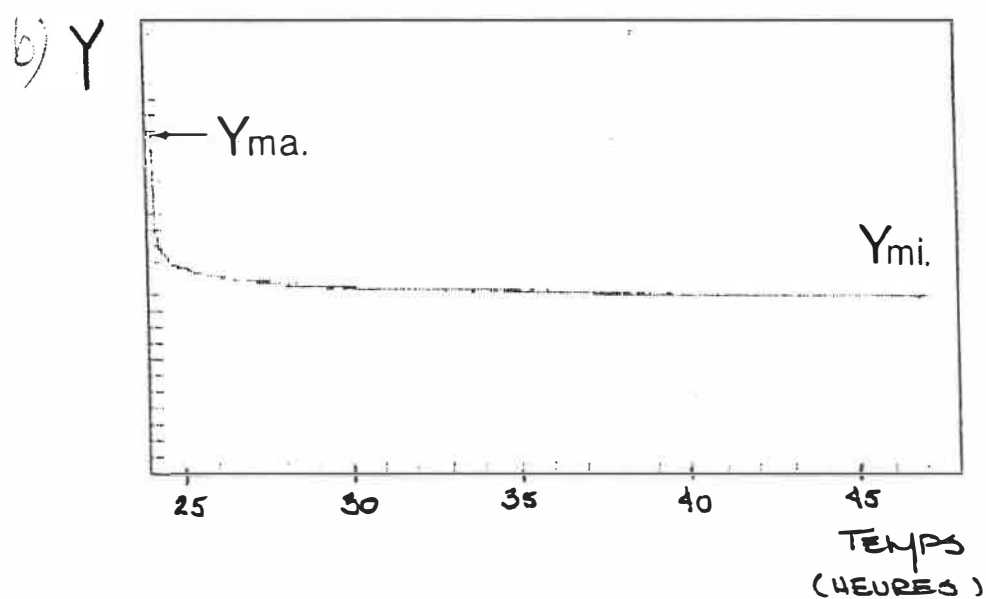
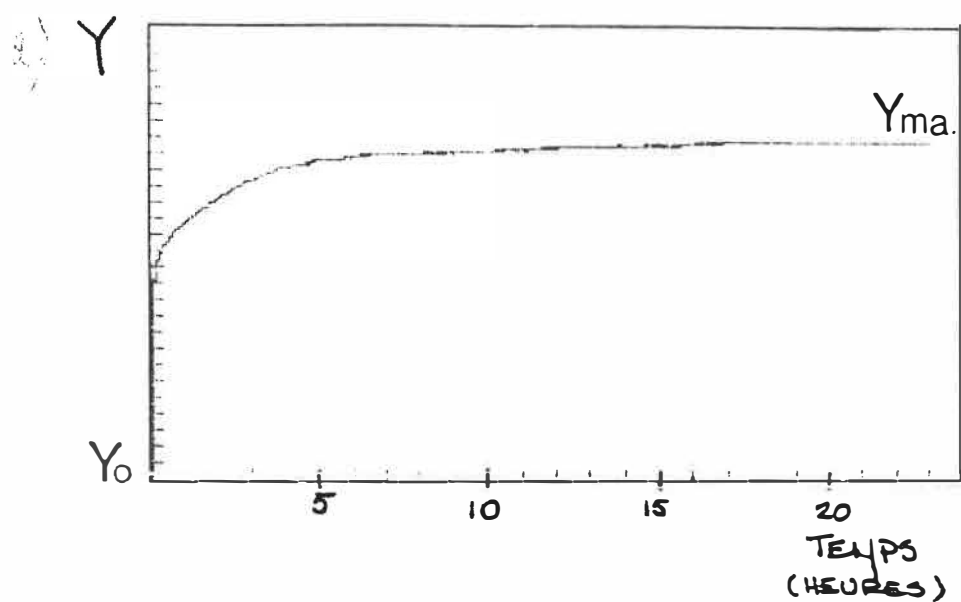
Cette autre série de tests a aussi été réalisée sur des joints d'étanchéité neufs. Chacun de ces joints d'étanchéité a été mesuré (A, B et D), puis testé pendant trois à six jours pour être finalement remesuré (A', B', C). Un seul joint de chaque matériau a été testé pour chacune des conditions.

Le test consiste à appliquer 2.1 MPa ou 5.5 MPa pendant vingt-quatre heures, puis à relâcher cette pression pendant les vingt-quatre heures suivantes. Ce cycle est repris continuellement pendant une période allant de trois à six jours.

Les deux paramètres les plus importants pour ces tests sont Y_{mi} et Y_{ma} , lesquels représentent la position minimale et la position maximale de la bille pendant un cycle de

quarante-huit heures. Y_0 représente la position initiale de la bille au début du test. La figure 4.16 illustre certains résultats bruts pour ces paramètres. Les figures 4.17 et 4.18 montrent l'évolution de Y_{mi} et Y_{ma} en fonction des jours pour tous les joints testés.

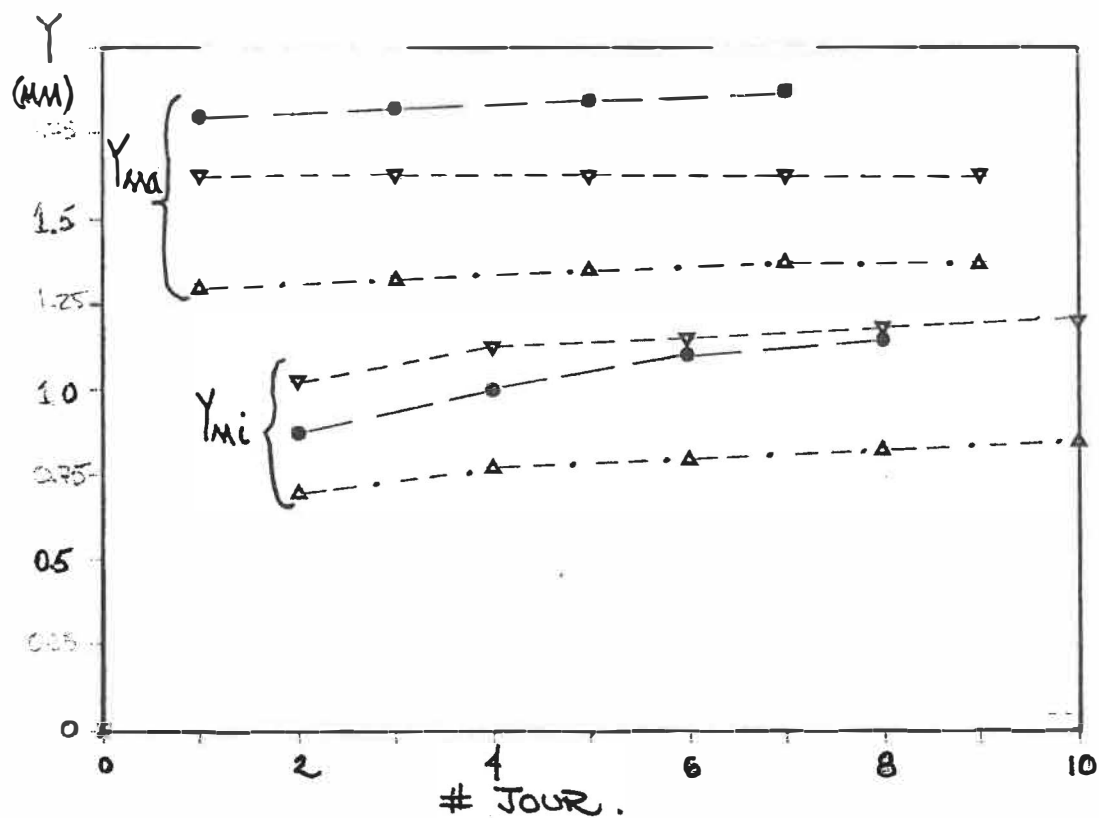
Lors de cette série de tests, il est ressorti que le joint d'étanchéité en UHMWPE est celui qui s'est déformé le moins sous la charge et celui qui a subi le moins de déformation permanente à la fin des tests. Les joints d'étanchéité en PTFE se sont déformés beaucoup plus et sont restés déformés à la suite des tests. C'est le joint en PTFE + 15 % de verre qui reste le plus déformé suite à un test; ceci est relié à sa faible contrainte à l'écoulement.



a) valve sous pression (24 heures)

b) recouvrance (24 heures)

Figure 4.16 - Premier cycle lors des tests de longue durée, illustrant le déplacement de la bille pour un premier cycle (forme générale de la courbe)

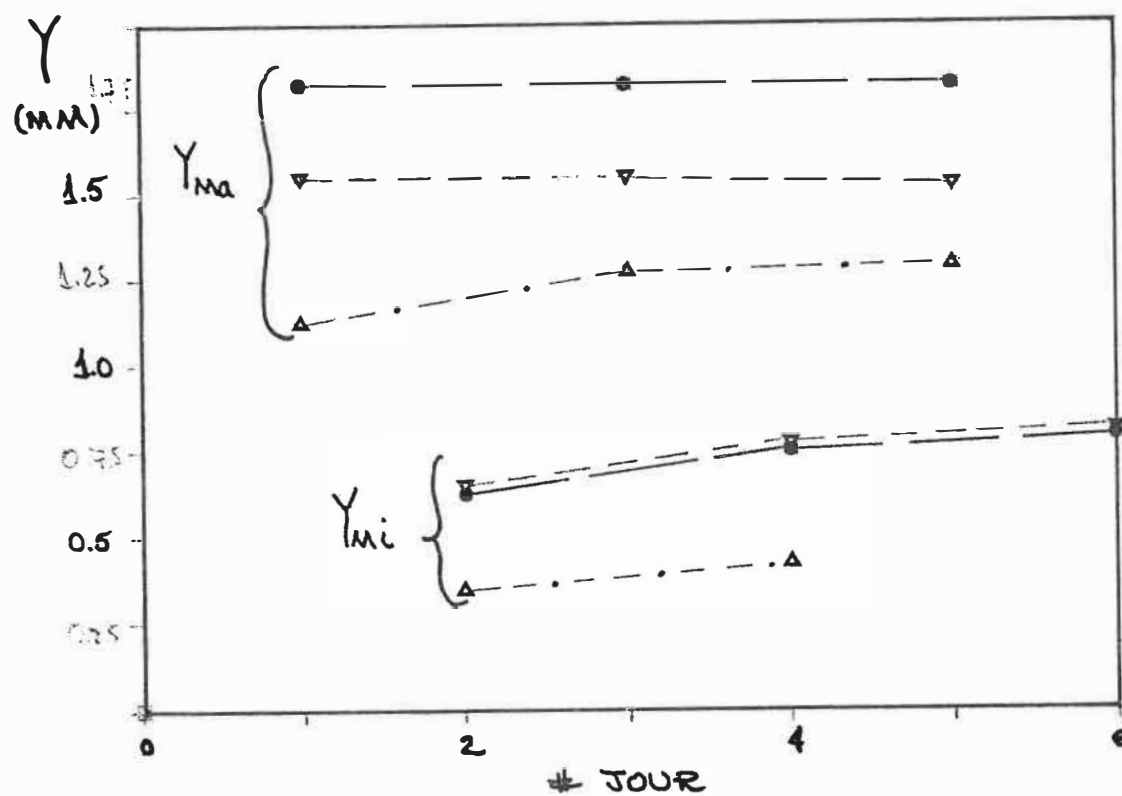


PTFE

PTFE + 15 % verre

UHMWPE

Figure 4.17 - Positions de la bille lors des tests à $P = 5.5$ MPa. Les courbes représentent les positions maximum et minimum pour chacun des matériaux durant les tests



- PTFE
- ▽ PTFE + 15 % verre
- △ UHMWPE

Figure 4.18 - Positions de la bille lors des tests à $P = 2.1$ MPa. Les courbes représentent l'enveloppe de la zone de déformation.

CHAPITRE V

MODÉLISATION PAR ÉLÉMENTS FINIS

Deux programmes sont utilisés lors de la modélisation du joint d'étanchéité. Le premier programme - écrit par M. Georges McIntyre, professeur à l'École Polytechnique de Montréal - fonctionne sur un IBM PC. Il est utilisé pour faire les analyses du comportement mécanique du joint d'étanchéité. Le second - GRAFEM - fonctionne sur VAX; il est utilisé pour faire le maillage des modèles.

5.1 MODÈLE D'ÉLÉMENTS FINIS DU JOINT D'ÉTANCHÉITÉ

La procédure décrite à la figure 5.1 est suivie pendant la période de raffinement du modèle du joint d'étanchéité.

La figure 5.2 représente le modèle définitif. Des éléments rectangulaires du second degré ont été choisis pour la modélisation parce qu'ils convergent vers une solution précise avec peu d'éléments. Plusieurs éléments triangulaires du second degré sont aussi utilisés pour le raffinement de la partie du joint d'étanchéité qui est en contact avec la bille et pour les zones de hauts gradients de contrainte près de chaque extrémité de la portion courbe du joint.

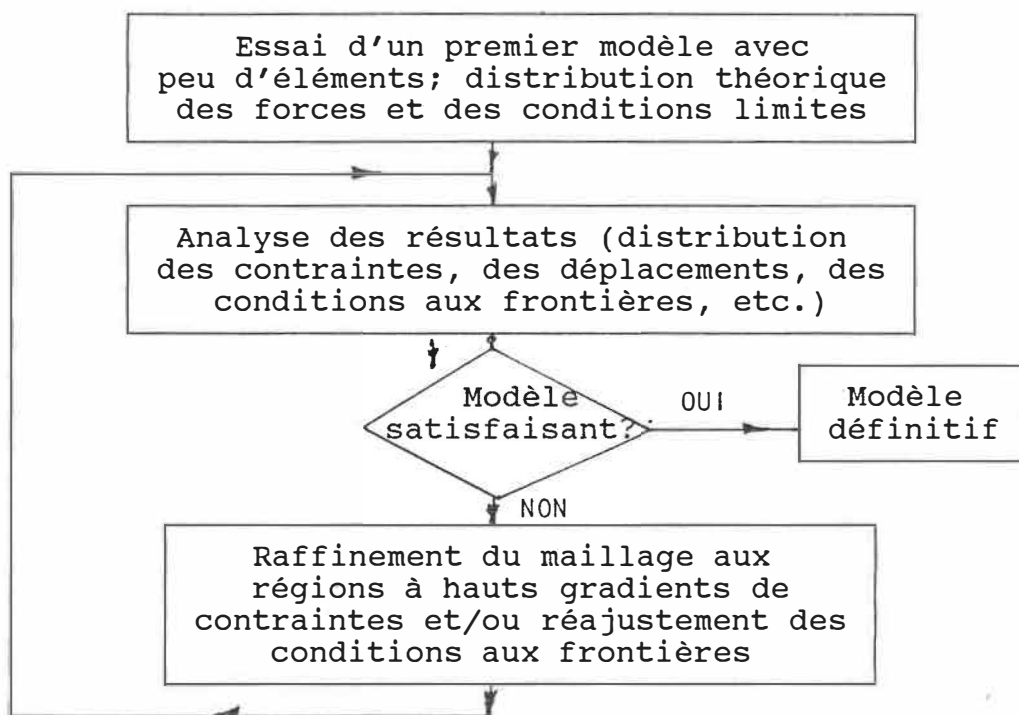
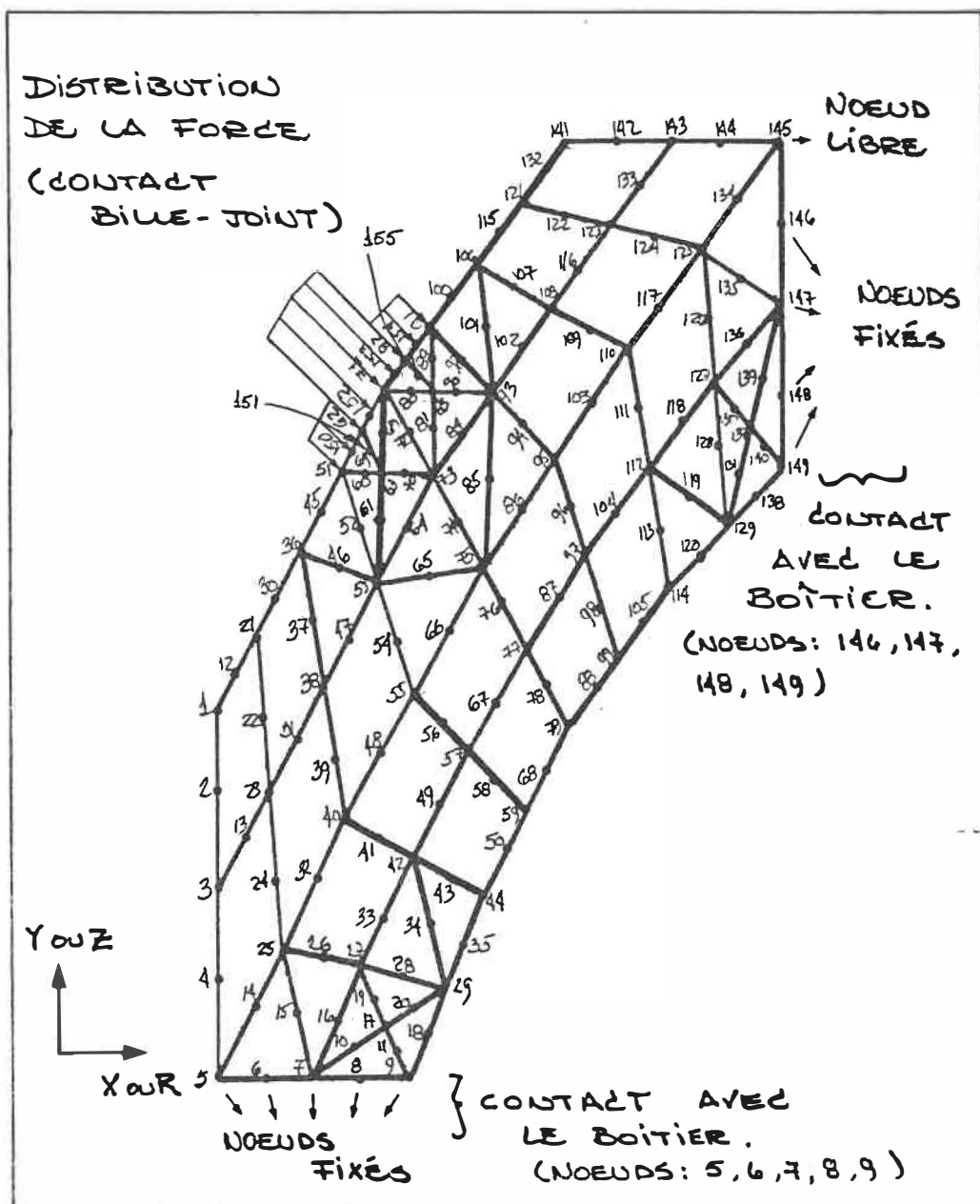


Figure 5.1 - Processus de raffinement du modèle mathématique du joint d'étanchéité



- Chaque noeud est numéroté.
- Cette figure n'est pas à l'échelle.

Figure 5.2 - Modèle définitif d'éléments finis et conditions aux frontières

5.1.1 Conditions aux frontières

La force transmise au joint par la bille est distribuée perpendiculairement sur les noeuds: 51, 150, 62, 152, 71, 153, 82, 154, 91.

Les noeuds des surfaces en contact avec le boîtier ont été fixés. Seul le noeud 145 a été relâché car on a observé qu'il se détache du boîtier lorsqu'une pression est appliquée à la valve en position fermée.

5.1.2 Distribution de la force

Quand la valve est sous pression en position fermée, la bille est soumise à une force totale, F_T , qui est transférée au joint d'étanchéité. Cette force peut être calculée par la formule suivante:

$$F_T = P \times S \quad 5.1$$

où P représente la pression dans la valve et S , l'aire projetée de la bille en contact avec le fluide sous pression.

La force totale normale appliquée au joint d'étanchéité, F_N est alors trouvée en résolvant le problème d'équilibre axisymétrique illustré à la figure 5.3.

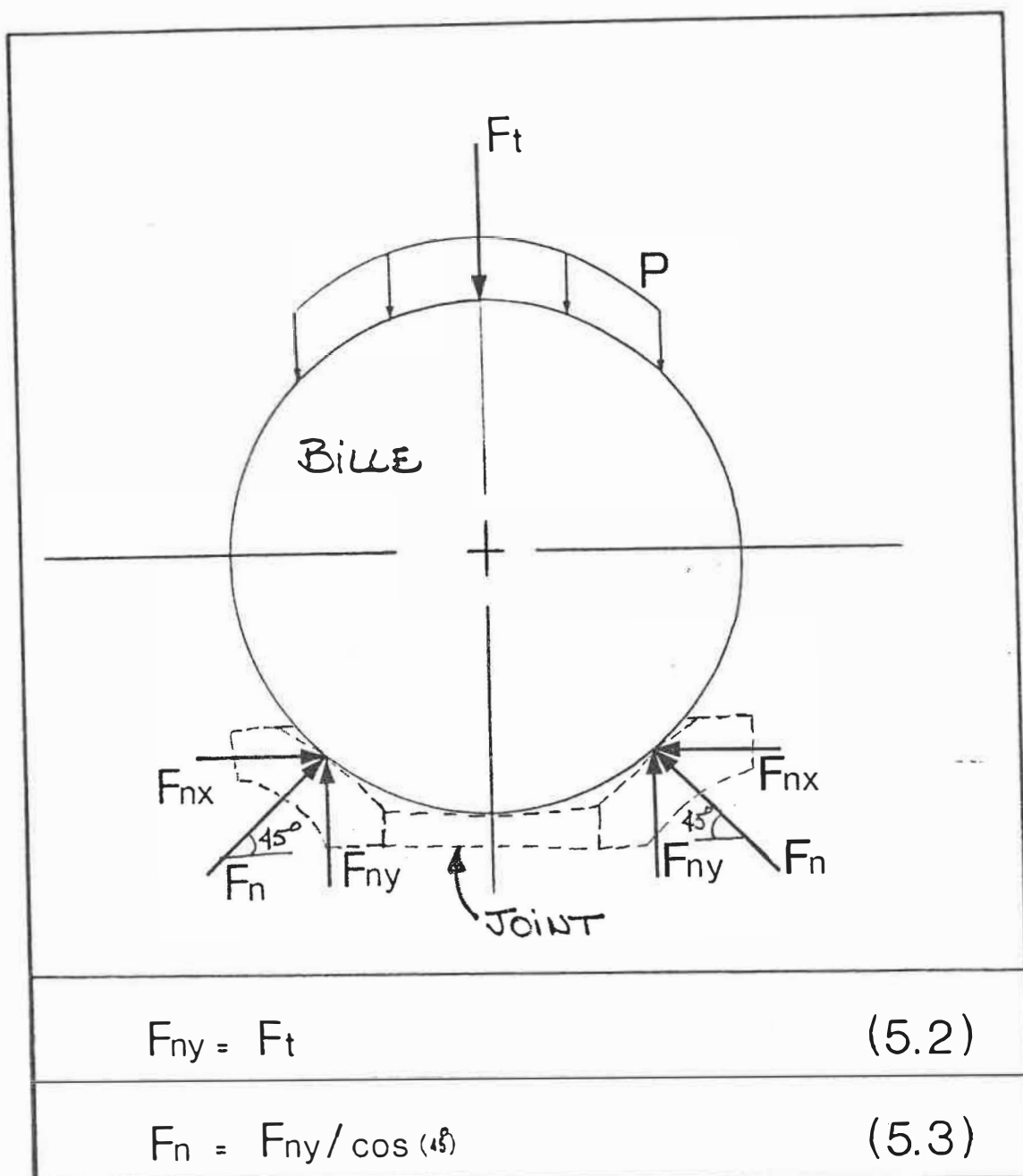


Figure 5.3 - Calcul de la force normale, F_N , appliquée au joint d'étanchéité (F_{Nx} et F_{Ny} sont les projections sur les axes principaux de F_N)

Cette force normale est alors distribuée le long du segment du joint d'étanchéité de largeur C , mesuré expérimentalement pour chaque type de joint d'étanchéité, de manière à produire un arc de cercle de rayon R , le même que celui de la bille.

5.2 PERFORMANCE DU MODÈLE

Le modèle présenté à la figure 5.2 est soumis à une distribution de force équivalente à une pression de 2.1 MPa (mêmes conditions que pendant les tests). Les contraintes et les déplacements pour tous les noeuds du modèle du joint d'étanchéité en PTFE sont présentés à l'annexe F. Le comportement mécanique de ce joint est représentatif de ceux en UHMWPE et en PTFE renforcé de fibres de verre.

Les contraintes supérieures à la contrainte à l'écoulement du joint d'étanchéité en PTFE ($\sigma_y = 8.3 \text{ MPa} = 1\,200 \text{ psi}$) se retrouvent près de la surface de contact entre la bille et le joint et près des surfaces du joint en contact avec le boîtier. L'analyse par éléments finis permet de prédire que ces zones seront déformées plastiquement.

La constante de rigidité ($\Delta P/\Delta X$) a été calculée par la méthode des éléments finis pour chacun des joints. Ces valeurs sont ensuite comparées à celles obtenues lors du premier des tests de courte durée (voir le tableau 5.1).

	$\Delta P/\Delta X$ EXP. (MPa/mm)	$\Delta P/\Delta X$ EL. FIN. (MPa/mm)	DIFF. (%)	MODULE ELAST. (MPa)	COEFFI. DE POISSON
PTFE	9.4	10.3	+ 10 %	400	0,4
PTFE + 15 % verre	11.2	6.2	- 45 %	230	0,4
UHMWPE	14.5	14.3	- 1 %	545	0,4

Tableau 5.1 - La constante de rigidité pour chacun des joints; mesure expérimentale vs calcul par éléments finis

Les joints faits de PTFE et de UHMWPE se comportent de façon semblable à celle prédite par l'analyse mathématique. Il est à noter, cependant, que le joint d'étanchéité fait de PTFE + 15 % de verre est beaucoup plus rigide que ce qui a été calculé. Le module d'élasticité en traction de ce matériau reflète peu son comportement en compression tel que démontré au chapitre III.

Les résultats des analyses pour les joints faits de UHMWPE et de PTFE permettent de croire que la rigidité d'un

joint est convenablement prédite à partir des propriétés mécaniques du matériau.

Une étude par éléments finis similaire à celle entreprise dans cet ouvrage peut être faite pour les joints d'étanchéité faisant partie de toute la gamme des valves de VELAN (1/2" à 12").

5.3 DISCUSSION

Le joint d'étanchéité fonctionne de la façon suivante:

- la forme arquée du joint d'étanchéité sert à supporter la bille lorsque la pression est imposée en amont de la valve (en position fermée). Les déplacements et contraintes sont tels que décrits précédemment;
- la forme arquée du joint permet aussi de reprendre la précompression entre la bille et les deux joints lors de l'assemblage;
- la précompression sert à faire passer le second test de production (voir le chapitre I);
- la forme arquée du joint permet enfin de reprendre les écarts de dimension dus aux tolérances d'usinage;

- les pointes des joints en contact avec la bille seront vite déformées lorsque la valve sera en usage.

L'assemblage d'une valve avec un joint passif (voir la figure 2.2), c'est-à-dire sans élasticité globale, entraînera nécessairement un mauvais contrôle de la contrainte entre la bille et les joints. Ceci entraînera aussi de grandes différences de couples d'opération d'une valve à l'autre. Le second test de production sera, pour les mêmes raisons, plus difficile à réaliser.

Le joint d'étanchéité "VELAN" remplit donc ses fonctions adéquatement.

Lorsque la contrainte imposée au joint est trop forte - comme c'est le cas des valves de grande taille ou à pression élevée - , il convient de supporter la bille ou de choisir un matériau possédant des propriétés mécaniques plus élevées. Dans ce dernier cas, la rigidité du joint pourra être prédite de la manière décrite dans cet ouvrage.

CONCLUSION

Ce projet visait à compléter le travail de recherche entrepris par M. Ripert sur les joints d'étanchéité en polymères utilisés par la compagnie Velan.

Une étude des matériaux plastiques pouvant servir à la fabrication des joints d'étanchéité a été faite et les propriétés importantes en regard de l'application ont été discutées.

Le PTFE présentement utilisé est le matériau le plus versatile en regard à son excellente résistance aux attaques chimiques et à sa tenue mécanique à haute température. Une addition de fibres de carbone, de verre ou de bronze peut lui conférer des propriétés supérieures en cyclage et/ou à haute température. Enfin, pour les quelques cas où le PTFE ne peut être utilisé, plusieurs autres polymères ont été étudiés.

L'étude expérimentale a permis de mieux comprendre le fonctionnement du joint. Des capteurs de déplacement ont été disposés de façon à mesurer les déplacements critiques suite à une augmentation de pression dans la valve. Des programmes d'acquisition et de traitement de données ont été écrits et ont servi à évaluer ces déplacements.

Des différents matériaux testés, le UHMWPE est celui qui a la meilleure tenue mécanique (rigidité supérieure et déformation permanente inférieure). La performance mécanique du PTFE est cependant adéquate pour les pressions normales d'opération d'une valve.

Une analyse par éléments finis linéaire et élastique du joint d'étanchéité a été faite. Le joint a été modélisé et soumis à des contraintes et à des conditions frontières telles qu'observées lors des expériences. Une bonne corrélation a été observée entre la rigidité mesurée expérimentalement et celle calculée par cette méthode pour le PTFE et l'UHMWPE (non renforcés). L'effet de l'addition de renforts a été discuté.

La forme actuelle du joint permet de passer aisément les tests de production et, plus important encore, elle permet de limiter les déformations permanentes qui résultent de grandes pressions différentielles supportées par la valve en position fermée. Une modification de la forme du joint n'entraînerait que bien peu de résultats quant à sa performance mécanique. Il serait plutôt souhaitable de choisir des polymères ayant un plus haut module élastique ou à supporter la bille lorsque la sollicitation du joint est particulièrement sévère.

RÉFÉRENCES

1. RIPERT, "Rapport interne portant sur la conception du joint d'étanchéité faisant partie des valves à clapet sphérique de la compagnie VELAN INC."
2. DUFOUR, R., NGUYEN, Q.X., CHALIFOUX, J.-P., "Mechanical Evaluation of Teflon Seal Materials", Rapport du CDT #C028, Décembre 1985.
3. "Dupont Mechanical Design Data Catalogue on PTFE", Dupont Publications.
4. TROTIGNON, J.-P., "Précis de matières plastiques", F. Nathan, 1982.
5. "Mechanical Applications for Filled TFE", Machine Design, 1967, pp. 163-164.
6. THEBERGE, J., COMAX, J., "Design Properties of a Series of Filled TFE Compounds", ASME Meetings, Décembre 1970.
7. CROSBY, J.M., CARRERO, C.A., TALLEY, K.L., "New Reinforcing Technology Provides Stronger Fluoro-carbons", Machine Design, 21 janvier 1982, pp. 79-84.

8. ATLAND, R.S., "Getting the Most Out of Melt-Processable Fluoroplastics Resins", Modern Plastics, Juin 1985, pp. 200-202.
9. "Plastics-Machine Design Material Reference Issue", Machine Design, 14 avril 1983.
10. "PPS: A Rugged Engineering Plastic", Mechanical Engineering, Mars 1985, pp. 39-40.
11. GOSNELL, R., "Desk-Top Data Bank/Extruding and Molding Grades 1978", Cordura Publications Inc., 1977.
12. BOWDEN, F.P., TABOR, D., "Friction et lubrication", Dunod Edition, 1959.
13. LANCASTER, J.K., "Friction and Wear", A.D. Jenkins (Ed.), Polymer Science, 1972.
14. NIELSEN, L.E., "Mechanical Properties of Polymers and Composites", Marcel Dekker, 1974.
15. BENABDALLAH, H., "Étude du frottement de glissement thermoplastique/métal en contact plan sur plan", Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, 1987.

16. "Standard Test Method for Deflection Temperature of Plastics under Flexural Load", Norme ASTM D-648-82, 1982.

ANNEXE A

DESSIN D'ASSEMBLAGE DE LA VALVE ÉTUDIÉE

MODÈLE: SB-300, 2" (51 mm)

LIST OF MATERIALS				DIMENSIONS, WEIGHT, FLOW, TORQUE	
NO	NAME	QTY	CARBON STEEL	STAINLESS STEEL	300 CLASS
			MATERIAL & SPEC	MATERIAL & SPEC	
1	BODY	1	WCB ASTM-A216	CF8M ASTM-A351	
2	BODY END	1	WCB ASTM-A216	CF8M ASTM-A351	
3	SEAT	2	TEFLON (1)	TEFLON (2)	
4	BALL	1	CS ASTM-A108 (1)	F316 ASTM-A182 (1)	
5	STEM	1	SS 316 S ASTM-A276	SS 316 S ASTM-A276	
6	THRUST WASHER	1	REINFORCED TEFLON	REINFORCED TEFLON	
7	BODY SEAL	1	SS 304 ASBESTOS	SS 304 ASBESTOS	
8	PACKING RING	3	TEFLON (1)	TEFLON (1)	
9	PACKING FLANGE	1	CS ASTM-A108	F316 ASTM-A182	
10	GLAND BUSHING	1	SS 304 ASTM-A302	SS 304 ASTM-A302	
11	STEM BUSHING	1	TEFLON (2)	TEFLON (2)	
12	BODY STUDS	SEE	GR B7 ASTM-A193	BBM-CL 2 ASTM-A193	
13	BODY NUTS	TABLE	GR 2H ASTM-A194	GRW ASTM-A194	
14	STOP PLATE	1	CS	CS	
15	GLAND BUSH SLEEVE	1	TEFLON (2)	TEFLON (2)	
16	HANDLE	1	MALL IRON	MALL IRON	
17	HANDLE NUT	1	CS PLATED (4)	CS PLATED (4)	
18	PACKING WASHER	1	SS 303 ASTM-A302	SS 303 ASTM-A302	
19	GLAND NUTS	2	GR 2H ASTM-A194	BBM ASTM-A194	
20	GLAND STUDS	2	GR B7 ASTM-A193	BBM-CL 2 ASTM-A193	
21	BEVELLED WASHER	2	CS PLATED	CS PLATED	
22	STOP PIN	2	CS ASTM-A108 C < 25	CS ASTM-A108 C < 25	
23	HANDLE WASHER	1	CS PLATED	CS PLATED	

NOTES: (1) FOR FIRE SAFE ASBESTOS OR GRAPHOIL
(2) OR GLASS FILLED TFE (AS SPECIFIED)
(3) HARD CHROME PLATED (AS SPECIFIED)
(4) SELF LOCKING

QTY OF MOLESH L

QTY OF STUDS K

TOP VIEW

VELAN
MAINTENANCE
BALL VALVE
SPLIT BODY FULL BORE
SB 300-740 PSI-51 BAR
2 1/2" 108
300 ANSI
NONE
SB 300
9999-112
11.09.83

ANNEXE B

RÉSULTATS DU TEST SUR L'APPAREIL DMTA POUR LE PTFE

L'appareil DMTA sert à caractériser les matériaux en observant leurs zones de transition. Le test consiste à fléchir d'une amplitude, d , de façon continue à une fréquence, f , un échantillon rectangulaire à une de ses extrémités pendant que l'autre extrémité est fixe. Les modules de perte E'' et de stockage E' de même que le déphasage entre ces signaux, $\tan \delta$ sont étudiés alors que la température ambiante est augmentée à un taux T . Voir ci-dessous pour les détails particuliers au test sur le PTFE. Les figures B.1 et B.2 présentent les courbes relatives à ce test.

Dimensions de l'échantillon: 12 mm x 11 mm x 1 mm)

Paramètres expérimentaux : $d = 64$ (lm)

$f = 1$ (Hz)

$T = 5$ (°C/mpo)

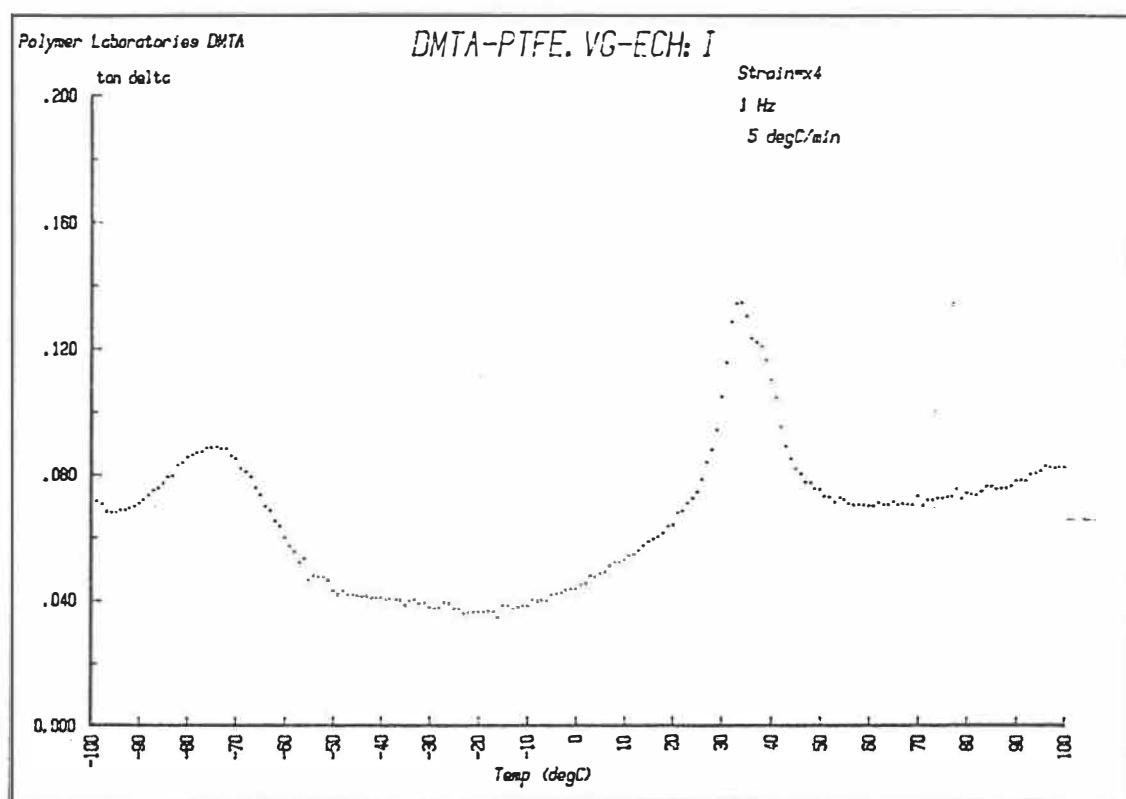


Figure B.1 - Angle de phase, tan δ , pour le PTFE

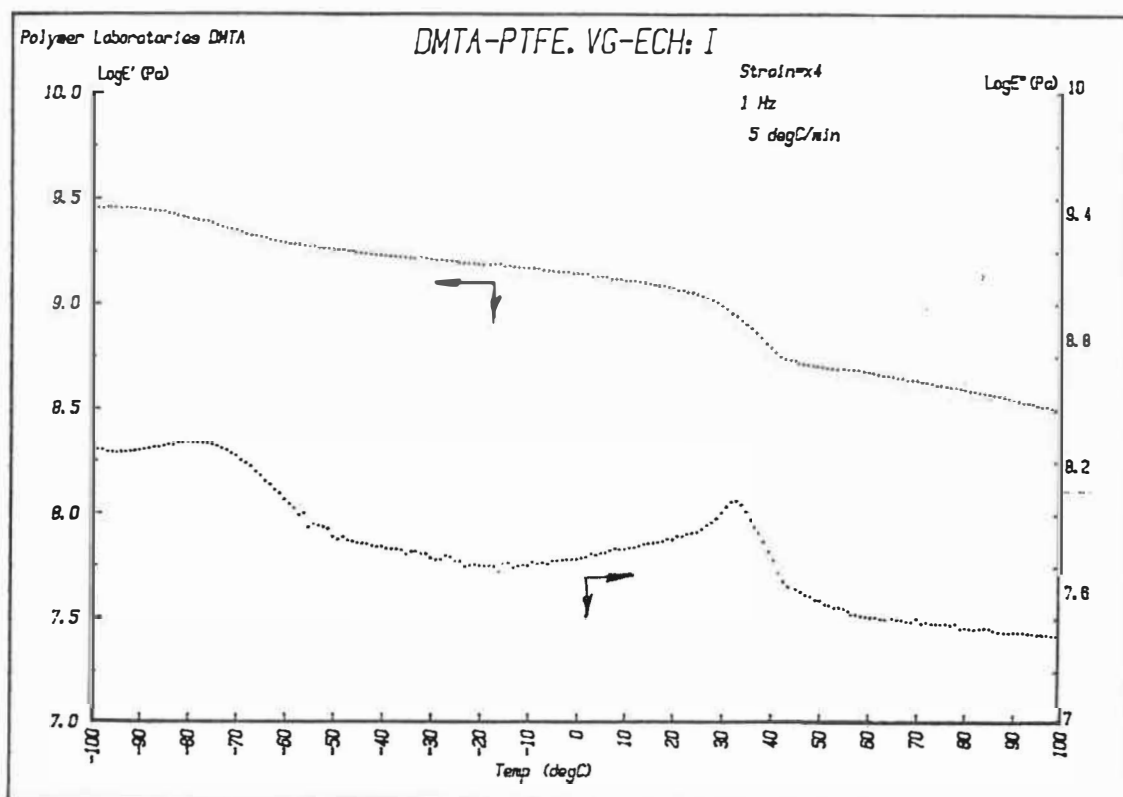


Figure B.2 - Modules de perte, E'' , et élastique, E' , pour le PTFE

ANNEXE C

DESCRIPTION DES TESTS DE TRACTION EFFECTUÉS
SUR QUELQUES POLYMÈRES

Les matériaux suivants ont été testés en accord avec la norme D-1708-84. Cette norme a été choisie car les dimensions de ses échantillons sont restreintes. Une bonne expérience avec ces échantillons a été acquise lors d'un premier travail en collaboration avec la compagnie Velan [2]. La figure C.1 montre les courbes caractéristiques des polymères décrits au tableau ci-dessous.

ÉCHANTILLON	MATÉRIAU	QUALITÉ*	PROCÉDÉ DE FABRICATION
A	PTFE	Bon	Moulage/compression + réduit
B	PTFE	Mauvais	Extrudé
C	PTFE + 15% fibres de verre	Bon	Moulage/compression + réduit
D	PTFE + 15% fibres de verre	Mauvais	Extrudé

* Évalué selon la performance du joint dans une valve au laboratoire de la compagnie Velan.

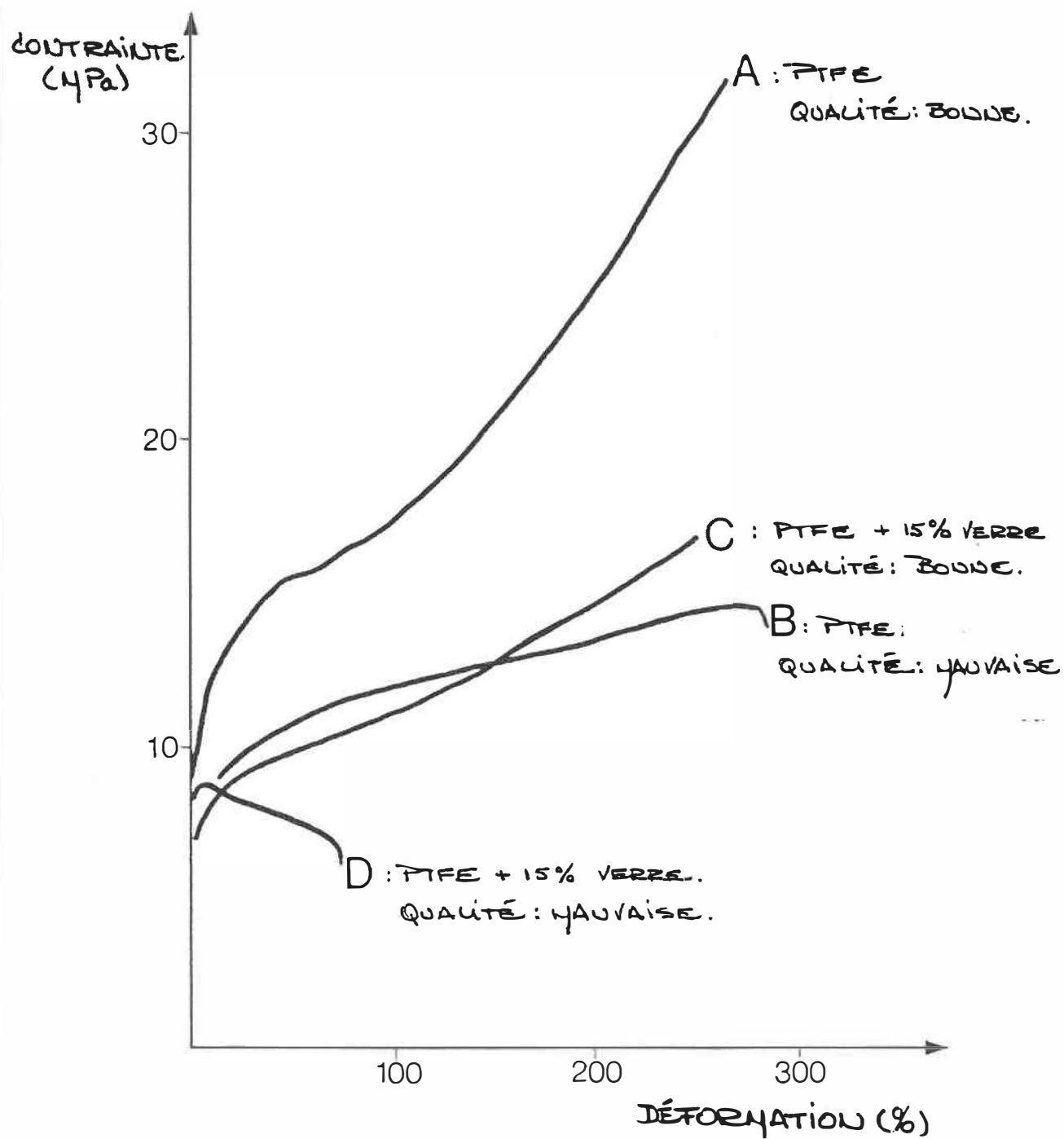


Figure C.1 - Courbes de traction caractéristiques de divers polymères

ANNEXE D

IMPRIMÉS DES PROGRAMMES ÉCRITS

```

10 REM
20 REM *** CALIBRATION PROGRAM ***
30 REM
40 REM * WRITTEN BY RICHARD DUFOUR *
50 REM
60 HOME
70 REM . ASSESSEMENT OF THE BASIC ADDRESS OF THE ANALOG/DIGITAL CONVERTER
80 ED = 49280
90 REM . NUMBER OF THE SLOT IN WHICH THE ANALOG/DIGITAL IS LOCATED
100 NO = 2
110 REM . NUMBER OF SIGNALS TO READ
120 J = 3
130 REM . ADDRESSES AT WHICH THE THREE TRANSDUCERS ARE LOCATED ON THE CARD
140 PO(1) = 2:PO(2) = 8:PO(3) = 14
150 REM . READING THE THREE TRANSDUCERS
160 FOR I = 1 TO J
170 SI(I) = PEEK (ED + NO * 16 + PO(I))
180 SI(I) = PEEK (ED + NO * 16 + PO(I))
190 SJ(I) = SI(I) * 10 / 255 - 5
200 SK(I) = INT (100 * SJ(I)) / 100
210 NEXT I
220 REM . PRINTING THE THREE VOLTAGES
230 FOR I = 1 TO J
240 VTAB 8 + 3 * I: PRINT " signal #";I;" :bit= "
250 VTAB 8 + 3 * I: PRINT " signal #";I;" :bit= ";SI(I)
260 VTAB 9 + 3 * I: PRINT " volt= "
270 VTAB 9 + 3 * I: PRINT " volt= ";SK(I)
280 NEXT I
290 GOTO 160

```

```

10 REM
20 REM   ***   STORAGE PROGRAM   ***
30 REM
40 REM   * WRITTEN BY RICHARD DUFOUR *
50 REM
60 REM
70 REM
80 REM   . MEMORY ADDRESS FROM WHICH THE DATA ARE BEING STORED
90 AD = 24577
100 D$ = CHR$(4)
110 HOME : VTAB 5
120 FOR I = 1 TO 4: PRINT : NEXT
130 PRINT : PRINT : INPUT " nom du fichier ";BA$
140 REM   . UNITS OF THE (X) AXIS
150 TU$ = "SECONDES"
160 REM   . NUMBER OF DATA STORED PER CHANNEL
170 NN = 500
180 REM   . PARAMETER CONTROLLING THE SPEED OF THE COMPUTER
190 F1 = 255
200 TIMEC ON VERSI ON FAC TO R( READ INGS / SEC.)
210 LS = 7
220 REM   . NUMBER OF CHANNEL TO READ
230 N1 = 3
240 REM   . VARIABLES ASSOCIATED WITH THE THREE ADDRESSES
250 NO$(1) = "LVDT2";NO$(2) = "PRESSION";NO$(3) = "LVDT14"
260 REM   . UNITS ASSOCIATED WITH THE THREE ADDRESSES
270 NP$(1) = "10-3 PO";NP$(2) = "PSI";NP$(3) = "10-3 PO"
280 REM   TRANSDUCER CONVERSION FACTORS
290 F(1) = 6.57678395
300 F(2) = 104.525975
310 F(3) = 5.15145271
320 REM   . SLOT NUMBER WHERE THE ANALOG/DIGITAL CONVERTER IS LOCATED
330 N2 = 2
340 REM   . ADDRESSES AT WHICH THE THREE TRANSDUCERS ARE LOCATED
350 NQ(1) = 2:NQ(2) = 8:NQ(3) = 14
360 FOR I = 1 TO 3
370 B1(I) = 49280 + N2 * 16 + NQ(I)
380 NEXT I
390 HOME
400 VTAB 15: INPUT "      taper -S- au clavier pour
      debuter l'acquisition ";S$
410 IF S$ = "S" THEN 430
420 IF NOT (S$ = "S") THEN 390
430 SPEED= F1: HOME
440 REM   . DRAWING OF THE AXIS
450 HOME : HGR2 : HCOLOR= 3
460 HPL0T 30,0 TO 30,150 TO 210,150 TO 210,0 TO 30,0

```

```

470 REM      . READING , STORAGE AND PLOTTING OF VOLTAGES SEVEN TIMES PER SECOND
480 FOR I = 1 TO NM
490 DE = PEEK (B1(1))
500 DE = PEEK (B1(1)): POKE AD + I,DE
510 HPLOT INT ((I) / ((NM - 1) / 180) + 30),( PEEK (AD + I) * - 1 + 300) / 2
520 FO = PEEK (B1(2))
530 FO = PEEK (B1(2)): POKE AD + NM + I,FO
540 HPLOT INT ((I) / ((NM - 1) / 180) + 30),( PEEK (AD + I + NM) * - 1 + 300) / 2
550 LO = PEEK (B1(3))
560 LO = PEEK (B1(3)): POKE AD + 2 * NM + I,LO
570 HPLOT INT ((I) / ((NM - 1) / 180) + 30),( PEEK (AD + I + 2 * NM) * - 1 + 300) / 2
580 IF L$ = "H" THEN GOTO 920
590 NEXT
600 SPEED= 255: CALL 64477
610 GOTO 870
620 REM      . PORTION OF THE PROGRAM PERMITTING TO REEXAMINE ONE OF THE CURVE OR TO STORE
    THE DATA ON ANOTHER DISK
630 TEXT : HOME : VTAB 5: PRINT " * Analyse des resultats au test *": PRINT : PRINT : PRINT
    "  votre choix ...": PRINT : PRINT : PRINT
640 FOR I = 1 TO N1: PRINT "      ";I;" " ;NO$(I);" VS TEMPS": NEXT
650 PRINT "      ";N1 + 1;" " Quitter le programme"
660 PRINT "      ";N1 + 2;" " Emmagasiner de nouveau les          resultats sur une autre
    disquette"
670 PRINT "      ";N1 + 3;" " Retour au menu principal"
680 PRINT : PRINT : PRINT : INPUT "                  ";D
690 IF D = N1 + 1 THEN GOTO 1070
700 IF D = N1 + 2 THEN GOTO 870
710 IF D = N1 + 3 THEN PRINT D$;"BLOAD CHAIN,A520": CALL 520*LO2"
720 HOME : VTAB 4
730 PRINT " * Parametres a determiner *"
740 OO = 1:N8 = 1:N9 = NM
750 PRINT : PRINT : PRINT : INPUT "      pas de la boucle qui effectue          le trace de
    la courbe ... ";OO
760 PRINT : INPUT "      desirez-vous voir la courbe en          portion (1) ou en totalite (
    2) .. ";NA
770 PRINT : IF NA = 1 THEN INPUT "      de la donnee ";N8
780 PRINT : IF NA = 1 THEN INPUT "      a la donnee ";N9
790 HGR2 : HOME : HCOLOR= 3
800 HPLOT 30,0 TO 30,150 TO 210,150 TO 210,0 TO 30,0
810 FOR I = N8 TO N9 STEP OO
820 HPLOT INT ((I - N8) / ((N9 - N8) / 180) + 30),( PEEK (AD + I + (D - 1) * NM) * - 1 +
    300) / 2
830 NEXT
840 VTAB 22
850 PRINT " Taper -X- pour retourner au menu ";: GET U$
860 GOTO 630
870 TEXT : HOME

```

```

880 REM      . WRITING ON DISK THE VOLTAGES IN MEMORY AND VARIABLES SPECIFIC TO THE EXPERIM
      ENT
890 VTAB 12: PRINT "  Enregistrement des donnees"
900 D$ = CHR$ (4)
910 PRINT D$;"OPEN "BAS""
920 PRINT D$;"WRITE "BAS""
930 PRINT TU$: PRINT LS
940 PRINT NM: PRINT F1: PRINT M1
950 FOR I = 1 TO M1: PRINT NO$(I): PRINT F(I): PRINT NP$(I): NEXT I
960 FOR I = 1 TO NM
970 PRINT PEEK (AD + I)
980 IF M1 = 1 THEN GOTO 1020
990 PRINT PEEK (AD + NM + I)
1000 IF M1 = 2 THEN GOTO 1020
1010 PRINT PEEK (AD + 2 * NM + I)
1020 NEXT I
1030 PRINT D$;"CLOSE "BAS""
1040 PRINT D$;"NOMON C,1,0"
1050 GOTO 630
1060 REM      . EXIT
1070 HOME : VTAB 12: INPUT "VOULEZ-VOUS VRAIMENT SORTIR          DU PROGRAMME (O/N) ";R2
      $
1080 IF R2$ = "N" THEN GOTO 630
1090 IF NOT (R2$ = "N" OR R2$ = "O") THEN GOTO 1070
1100 END

```

```

10 REM
20 REM *** GRAPHIC REPRESENTATION PROGRAM ***
30 REM $ WRITTEN BY RICHARD DUFOUR $
40 REM
50 REM . MEMORY ADDRESS AT WHICH THE DATA WILL START BEING STORED
60 AD = 24577
70 HOME
80 D$ = CHR$(4)
90 REM . LOADING FROM THE DISK THE DATA FROM A PREVIOUS EXPERIMENT
100 VTAB 14: INPUT " Nom du fichier de donnees ... ";BA$
110 HOME : VTAB 12: PRINT " $ chargement du fichier de donnees $"
120 VTAB 14: PRINT " ";BA$
130 D$ = CHR$(4)
140 PRINT D$;"OPEN "BA$""
150 PRINT D$;"READ "BA$""
160 INPUT TU$: INPUT TX
170 INPUT NN: INPUT F1: INPUT N1
180 FOR I = 1 TO N1: INPUT NO$(I): INPUT F(I): INPUT NP$(I): NEXT I
190 FOR I = 1 TO NN
200 INPUT T: POKE AD + I,T
210 IF N1 = 1 THEN GOTO 250
220 INPUT U: POKE AD + NN + I,U
230 IF N1 = 2 THEN GOTO 250
240 INPUT V: POKE AD + 2 * NN + I,V
250 NEXT I
260 PRINT D$;"CLOSE "BA$""
270 REM . MINIMUM AND MAXIMUM VOLTAGES FOR THE THREE TRANSDUCERS
280 FOR RT = 1 TO 3:M(RT) = 300:M2(RT) = - 8: NEXT
290 HOME : VTAB 12: PRINT " $ calcul des minima et maxima des variables"
300 FOR DD = 1 TO N1
310 FOR I = 1 TO NN
320 IF PEEK (AD + (DD - 1) * NN + I) > M2(DD) THEN M2(DD) = PEEK (AD + (DD - 1) * NN + I)
330 IF PEEK (AD + (DD - 1) * NN + I) < M(DD) THEN M(DD) = PEEK (AD + (DD - 1) * NN + I)
340 NEXT I
350 IF N1 = 1 THEN GOTO 370
360 IF N1 = 2 THEN GOTO 370
370 NEXT DD
380 REM . CHOICE OF THE CURVE TO BE DRAWN
390 TEXT : HOME : PRINT : PRINT : PRINT " Choisir une option": PRINT
400 FOR I = 1 TO N1: PRINT " ";I;" ) courbe ";NO$(I);" VS TEMPS": NEXT
410 PRINT " ";N1 + 1;" ) quitter le programme"
420 PRINT " ";N1 + 2;" ) analyse d'un autre fichier"
430 PRINT " ";N1 + 3;" ) retour au menu principal"
440 PRINT : PRINT : PRINT : INPUT " .....";D
450 IF D = N1 + 1 THEN GOTO 990
460 IF D = N1 + 2 THEN GOTO 70

```

```

470 IF D = N1 + 3 THEN D$ = CHR$ (4); PRINT D$;"BLOAD CHAIN,A520": CALL 520"L02"
480 REM      . CHOICE OF THE PARAMETERS INVOLVED WITH THE GRAPH CREATION
490 HOME : VTAB 4: PRINT "  Desirez-vous tracer la courbe          en accord avec les par
      ametres          suivants ..."
500 PRINT : PRINT : PRINT
510 PRINT : PRINT "  Tous les points traces"
520 PRINT "  Axe des Y de 0 au maximum"
530 PRINT "  Points relies"
540 VTAB 20: INPUT "      Reponce (o/n) ... ";RT$
550 IF RT$ = "0" THEN OO = 1:N8 = 1:N9 = NN:N6 = 0:N7 = ((M2(D) - M(D)) * 100 / 255) * F(D)
      :RR$ = "N":RS$ = "0": HOME : GOTO 740
560 OO = 1:N8 = 1:N9 = NN
570 HOME : VTAB 3: INPUT "  Inscrire le pas de la boucle qui          trace la courbe ";OO
580 PRINT : PRINT "  Desirez-vous voir la courbe          1) En entier"
590 INPUT "  2) En portion ( de t1 a t2 ) ";NA: PRINT
600 IF NA = 2 THEN PRINT : INPUT "  t1= ";N2
610 IF NA = 2 THEN INPUT "  t2= ";N3
620 IF NA = 2 THEN N8 = INT (TX * N2):N9 = INT (TX * N3)
630 PRINT
640 HOME : VTAB 3
650 INPUT "  Axe des y par default -1- ou choix          de l'utilisateur -2- ";R3$
660 IF NOT (R3$ = "2" OR R3$ = "1") THEN GOTO 640
670 N6 = M(D) * 100 / 255 * F(D):N7 = ((M2(D) - M(D)) * 100 / 255) * F(D):N4 = N6:N5 = N7
680 IF R3$ = "2" THEN PRINT "  ( Min=0 ; Max="; INT (((M2(D) - M(D)) * 100 / 255) * F(D) *
      960) / 1000;" ) ";NP$(D): PRINT
690 IF R3$ = "2" THEN PRINT : INPUT "  Ymin = ";N6: PRINT
700 IF R3$ = "2" THEN PRINT : INPUT "  Ymax = ";N7
710 PRINT : PRINT
720 INPUT "  Axe du temps logarithmique (o/n) ? ";RR$
730 PRINT : PRINT : INPUT "  Points relies (o/n) ? ";RS$
740 LX$ = "TEMPS " + CHR$ (40) + TU$ + CHR$ (41)
750 LY$ = NO$(D) + CHR$ (32) + CHR$ (40) + NP$(D) + CHR$ (41)
760 REM      . CREATION ON THE SCREEN OF THE GRAPH
770 HGR2 : HCOLOR= 3: HOME
780 REM &SCALE DEFINIT LES DIMENSIONS DE L'ECRAN
790 & SCALE,(N8 - 1) / TX,(N9 + N9 / 10) / TX,N6,N7 + N7 / 30
800 IF RR$ = "0" AND N8 = 0 THEN N8 = 1
810 IF RR$ = "0" THEN & LOG X
820 & LABELAXES,((N9 - N8) / TX / 5),(1000 * (N7 - N6) / 5) / 1000
830 & AXES,(N8 - 1) / TX,N6,((N9 - N8) / TX / 5) / 4,(1000 * (N7 - N6) / 20) / 1000
840 FOR I = N8 TO N9 STEP OO
850 & DRAW ,I / TX,(( PEEK (AD + I + (D - 1) * NN)) - M(D)) * 100 / 255 * F(D)
860 IF RS$ = "N" THEN & PENUP
870 NEXT I
880 INPUT P$
890 REM      . OPTION TO DUMP THE SCREEN ON THE PLOTTER
900 IF P$ = "I" THEN GOTO 1040

```

```

910 REM      . OPTION TO RETURN TO THE MAIN MENU
920 IF P$ = "X" THEN 390
930 REM      . OPTION TO PRINT ALL THE EXPERIMENTAL DATA
940 IF P$ = "V" THEN GOTO 1170
950 IF NOT (X$ = "X" OR X$ = "V" OR X$ = "I") THEN GOTO 880
960 TEXT : HOME
970 GOTO 390
980 REM      . EXIT
990 HOME : VTAB 15: INPUT " VOULEZ-VOUS VRAIMENT SORTIR DU      PROGRAMME (O/N) ";R2$
1000 IF R2$ = "N" THEN GOTO 390
1010 IF NOT (R2$ = "O" OR R2$ = "N") THEN GOTO 990
1020 END
1030 REM      . PRINTING OF THE EXPERIMENTAL PARAMETERS
1040 PR# 1: PR# 1
1050 PRINT "          Nom du fichier: ";BA$: PRINT
1060 PRINT "          Nb de lectures / canal: ";NN
1070 PRINT "          Duree de l'essai: "; INT (NN / TX * 100) / 10; " ";TU$
1080 NB = (M2(D) - M(D)) * FD / 255 * FT
1090 PRINT "          Maximum: "; INT (NB * 10000) / 1000; " ";NP$(D)
1100 PRINT "          -----"
1110 REM      . DUMPING THE SCREEN TO THE PLOTTER
1120 PRINT CHR$(4);"PR#1"
1130 PRINT CHR$(9);"G2"
1140 PRINT CHR$(4);"PR#0"
1150 PR# 0: GOTO 880
1160 REM      . PRINTING ALL THE EXPERIMENTAL DATA
1170 PR# 1: PR# 1
1180 PRINT " TEMPS ( ";TU$; " ) ";ND$(1); " ";ND$(2); " ";ND$(3)
1190 FOR I = 1 TO NN
1200 PRINT INT (I / TX * 100) / 10; " ";
1210 PRINT INT ((( PEEK (AD + I)) - M(1)) * 100 / 255 * F(1) * 960) / 1000; " ";
1220 PRINT INT ((( PEEK (AD + I + NN)) - M(2)) * 100 / 255 * F(2) * 960) / 1000; " ";
1230 PRINT INT ((( PEEK (AD + I + 2 * NN)) - M(3)) * 100 / 255 * F(3) * 960) / 1000
1240 NEXT
1250 PR# 0
1260 GOTO 880

```

ANNEXE E

RÉSULTATS DE LA SÉRIE DE TESTS SUR LES JOINTS D'ÉTANCHÉITÉ

Matériau: PTFE
Pression: 2.1 MPa

MESURES					
Jour no	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
A (mm)	7.51	7.45	7.50	7.40	7.40
B (mm)	6.68	6.55	6.58	6.57	6.61
C (mm)	2.1	2.6	2.7	2.4	2.8
D (10^{-3} po)	39.2	36.3	35.4	33.6	33.0
A' (mm)	6.52	7.38	7.38	7.35	7.36
B' (mm)	6.61	6.56	6.54	6.58	6.62
PARAMÈTRES ÉTUDIÉS					
Jour no	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Pmax (psi)	332	328	328	328	332
$\Delta P/\Delta T$ (psi/sec)	270	296	296	301	299
Xel (10^{-3} po)	11.1	9.3	9.5	9.3	9.5
Yel (10^{-3} po)	20.1	17.0	17.0	17.0	17.0
$\Delta P/\Delta X$ (psi/ 10^{-3} po)	34.5	41.4	40.3	41.2	39.2
Xmax (10^{-3} po)	17.0	13.9	15.1	15.4	16.4
Ymax (10^{-3} po)	30.7	25.8	27.6	27.9	28.6
Xrec (10^{-3} po)	7.9	7.9	8.5	8.9	10.1
Yrec (10^{-3} po)	13.9	14.4	15.5	15.7	17.3
Xtrec (10^{-3} po)	11.7	11.1	11.9	12.3	13.3
Ytrec (10^{-3} po)	21.2	20.9	21.9	22.7	23.5
Xfpo (10^{-3} po)	5.3	2.8	3.2	3.0	3.0
Yfpo (10^{-3} po)	9.5	4.9	5.7	5.2	5.2
%Xtrec —— Xmax	69%	80%	79%	80%	82%
%Ytrec —— Ymax	69%	81%	79%	82%	82%

Tests de courte durée

Matériau: PTFE + 15% verre
 Pression: 2.1 MPa

MESURES					
Jour no	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
A (mm)	7.46	7.23	7.24	7.19	7.18
B (mm)	6.44	6.35	6.41	6.32	6.33
C (mm)	2.0	2.2	2.7	2.9	3.3
D (10^{-3} po)	40.49	36.9	34.5	33.8	33.9
A' (mm)	7.30	7.20	7.27	7.15	7.20
B' (mm)	6.27	6.31	6.45	6.35	6.35
PARAMÈTRES ÉTUDIÉS					
Jour no	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Pmax (psi)	328	332	328	328	332
$\Delta P/\Delta T$ (psi/sec)	270	294	298	302	285
Xel (10^{-3} po)	8.5	7.1	8.1	9.1	9.5
Yel (10^{-3} po)	16.8	13.9	14.7	15.7	16.0
$\Delta P/\Delta X$ (psi/ 10^{-3} po)	41.3	50.5	41.2	41.9	35.4
Xmax (10^{-3} po)	16.2	12.9	15.2	15.8	16.6
Ymax (10^{-3} po)	29.4	23.7	26.1	26.6	27.1
Xrec (10^{-3} po)	7.1	7.1	8.1	7.1	8.9
Yrec (10^{-3} po)	11.9	11.9	12.9	12.9	13.9
Xtrec (10^{-3} po)	10.7	10.3	11.7	12.1	12.9
Ytrec (10^{-3} po)	18.6	18.3	19.6	20.4	21.4
Xfpo (10^{-3} po)	5.5	2.6	3.4	3.6	3.6
Yfpo (10^{-3} po)	10.8	5.4	6.5	6.2	5.7
%Xtrec —— Xmax	66%	80%	77%	77%	78%
%Ytrec —— Ymax	63%	77%	75%	77%	79%

Tests de courte durée

Matériau: UHMWPE
Pression: 2.1 MPa

MESURES					
Jour no	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
A (mm)	7.40	7.40	7.39	7.37	7.41
B (mm)	6.48	6.42	6.48	6.46	6.45
C (mm)	1.3	1.3-1.5	1.2-1.7	1.5	1.3-1.8
D (10^{-3} po)	---	---	---	---	---
A' (mm)	7.36	7.36	7.36	7.40	7.36
B' (mm)	6.42	6.41	6.45	6.43	6.46
PARAMÈTRES ÉTUDIÉS					
Jour no	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Pmax (psi)	332	228	332	332	332
$\Delta P/\Delta T$ (psi/sec)	287	290	287	294	299
Xel (10^{-3} po)	9.1	8.9	8.7	7.9	7.1
Yel (10^{-3} po)	17.5	16.3	15.2	14.4	13.7
$\Delta P/\Delta X$ (psi/ 10^{-3} po)	53.3	62.1	61.3	58.5	61.0
Xmax (10^{-3} po)	11.9	11.3	11.5	10.9	10.3
Ymax (10^{-3} po)	23.0	21.2	20.3	20.4	20.1
Xrec (10^{-3} po)	5.9	6.3	5.7	5.7	4.7
Yrec (10^{-3} po)	9.0	9.5	9.3	9.5	10.3
Xtrec (10^{-3} po)	8.5	8.3	7.9	7.7	7.5
Ytrec (10^{-3} po)	15.7	15.2	14.7	14.4	14.4
Xfpo (10^{-3} po)	3.4	3.0	3.6	3.2	2.8
Yfpo (10^{-3} po)	7.2	5.9	6.2	5.9	5.7
%Xtrec ——— Xmax	71%	73%	68%	70%	73%
%Ytrec ——— Ymax	69%	72%	73%	71%	72%

Tests de courte durée

Matériau: PTFE
 Pression: 5.5 MPa

MESURES					
Jour no	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
A (mm)	7.56	7.18	7.05	6.99	6.98
B (mm)	6.67	6.58	6.53	6.55	6.51
C (mm)	6.2-8.7	9.2	8.9	7.3	8.5
D (10^{-3} po)	41.1	27.4	24.4	22.3	20.71
A' (mm)	7.11	6.99	6.93	6.91	6.98
B' (mm)	6.61	6.53	6.54	6.55	6.55
PARAMÈTRES ÉTUDIÉS					
Jour no	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Pmax (psi)	836	808	812	812	
$\Delta P/\Delta T$ (psi/sec)					
Xel (10^{-3} po)	44.4	46.2	40.0	37.2	35.6
Yel (10^{-3} po)					
$\Delta P/\Delta X$ (psi/ 10^{-3} po)					
Xmax (10^{-3} po)					
Ymax (10^{-3} po)	73.9	49.5	42.8	39.7	38.4
Xrec (10^{-3} po)					
Yrec (10^{-3} po)	24.7	24.0	19.6	21.4	20.9
Xtrec (10^{-3} po)					
Ytrec (10^{-3} po)	38.6	34.3	31.5	30.7	29.9
Xfpo (10^{-3} po)					
Yfpo (10^{-3} po)	35.3	15.2	11.1	9.03	8.5
%Xtrec					
Xmax					
%Ytrec					
Ymax	52%	69%	74%	77%	78%

Tests de courte durée

Matériau: PTFE + 15% verre
 Pression: 5.5 MPa

MESURES					
Jour no	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
A (mm)	7.56	7.05	7.00	6.98	6.98
B (mm)	6.67	6.46	6.45	6.44	6.51
C (mm)	6.2-8.7	10.5	8.3	10.5	8.5
D (10^{-3} po)	41.1	24.3	20.3	19.1	20.71
A' (mm)	7.11	6.94	6.99	6.97	6.98
B' (mm)	6.61	6.47	6.39	6.42	6.55
PARAMÈTRES ÉTUDIÉS					
Jour no	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Pmax (psi)	812	812	816	816	816
$\Delta P/\Delta T$ (psi/sec)					
Xel (10^{-3} po)					
Yel (10^{-3} po)	63.2	37.1	31.7	29.7	28.5
$\Delta P/\Delta X$ (psi/ 10^{-3} po)					
Xmax (10^{-3} po)					
Ymax (10^{-3} po)	66.5	39.2	33.8	31.5	30.2
Xrec (10^{-3} po)					
Yrec (10^{-3} po)	18.3	18.1	16.5	16.5	16.0
Xtrec (10^{-3} po)					
Ytrec (10^{-3} po)	30.9	27.3	25.5	25.0	24.2
Xfpo (10^{-3} po)					
Yfpo (10^{-3} po)	35.6	11.9	8.3	6.5	5.9
%Xtrec					
Xmax					
%Ytrec					
Ymax	47%	70%	76%	80%	80%

Tests de courte durée

Matériau: UHMWPE
 Pression: 5.5 MPa

MESURES					
Jour no	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
A (mm)	7.47	7.27	7.21	7.17	7.15
B (mm)	6.57	6.59	6.50	6.44	6.51
C (mm)	8.2	8.1	8.4	7.3	7.8
D (10^{-3} po)	---	---	---	---	---
A' (mm)	7.26	7.10	7.10	7.05	7.08
B' (mm)	6.51	6.49	6.52	6.48	6.51
PARAMÈTRES ÉTUDIÉS					
Jour no	# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
Pmax (psi)	816	820	820	820	820
$\Delta P/\Delta T$ (psi/sec)					
Xel (10^{-3} po)					
Yel (10^{-3} po)	38.4	34.6	30.2	30.7	29.4
$\Delta P/\Delta X$ (psi/ 10^{-3} po)					
Xmax (10^{-3} po)					
Ymax (10^{-3} po)	58.8	49.8	44.4	43.9	42.0
Xrec (10^{-3} po)					
Yrec (10^{-3} po)	27.9	24.5	24.0	23.0	23.2
Xtrec (10^{-3} po)					
Ytrec (10^{-3} po)	35.1	31.7	29.9	29.4	28.9
Xfpo (10^{-3} po)					
Yfpo (10^{-3} po)	23.7	18.1	14.4	14.4	13.2
%Xtrec					
Xmax					
%Ytrec					
Ymax	60%	64%	67%	67%	69%

Tests de courte durée

	PTFE		PTFE + VERRE		UHMWPE	
	Y_{Mi}	Y_{Ma}	Y_{Mi}	Y_{Ma}	Y_{Mi}	Y_{Ma}
0	--		--		--	
1		1.84		1.55		1.11
2	0.61		0.65		0.35	
3		1.84		1.57		1.30
4	0.75		0.78		0.40	
5		1.84		1.58		1.32
6	0.81		0.83		--	

$P = 2.1 \text{ MPa}$

Tests de longue durée

Toutes les dimensions sont en mm.

	PTFE		PTFE + VERRE		UHMWPE	
	Y_{Mi}	Y_{Ma}	Y_{Mi}	Y_{Ma}	Y_{Mi}	Y_{Ma}
0	--					
1		1.80		1.63		1.30
2	0.88		1.05		0.68	
3		1.83		1.63		1.32
4	1.00		1.10		0.77	
5		1.88		1.62		1.34
6	1.10		1.12		0.79	
7		1.89		1.61		1.35
8	1.12		1.15		0.81	
9						1.35
10			1.18		0.83	

$P = 5.5 \text{ MPa}$

Tests de longue durée

Toutes les dimensions sont en mm.

ANNEXE F

DONNÉES ET RÉSULTATS DE L'ANALYSE PAR ÉLÉMENTS FINIS

DONNEES DU MODELE

Joint d'etancheite final

12-12-1967 00:11:04

Nom du fichier de donnees: a:joint3

COORDONNEES DES NOEUDS

NOEUD	COORD. X/R	COORD. Y/Z	NOEUD	COORD. X/R	COORD. Y/Z
1	1.00	0.20	2	1.00	0.15
3	1.00	0.10	4	1.00	0.05
5	1.00	0.00	6	1.04	0.00
7	1.09	0.00	8	1.13	0.00
9	1.17	0.00	10	1.12	0.01
11	1.16	0.01	12	1.02	0.22
13	1.02	0.13	14	1.03	0.04
15	1.07	0.03	16	1.11	0.03
17	1.15	0.03	18	1.19	0.03
19	1.14	0.05	20	1.17	0.04
21	1.04	0.25	22	1.04	0.20
23	1.05	0.16	24	1.03	0.12
25	1.06	0.07	26	1.09	0.07
27	1.13	0.06	28	1.16	0.06
29	1.20	0.05	30	1.06	0.27
31	1.07	0.19	32	1.09	0.11
33	1.15	0.09	34	1.18	0.08
35	1.22	0.08	36	1.08	0.29
37	1.08	0.25	38	1.09	0.22
39	1.10	0.16	40	1.11	0.14
41	1.14	0.13	42	1.17	0.12
43	1.20	0.11	44	1.23	0.10
45	1.09	0.31	46	1.11	0.28
47	1.12	0.25	48	1.14	0.18
49	1.20	0.15	50	1.25	0.12
51	1.11	0.34	52	1.13	0.30
53	1.14	0.27	54	1.16	0.24
55	1.17	0.21	56	1.20	0.20
57	1.22	0.18	58	1.25	0.16
59	1.27	0.15	60	1.13	0.33
61	1.15	0.30	62	1.13	0.36
63	1.15	0.33	64	1.17	0.30
65	1.19	0.27	66	1.20	0.25

COOR.			COOR		
NOEUD	X/R	Y/Z	NOEUD	X/R	Y/Z
67	1.25	0.21	68	1.29	0.17
69	1.15	0.35	70	1.17	0.33
71	1.15	0.38	72	1.17	0.36
73	1.19	0.33	74	1.21	0.31
75	1.24	0.28	76	1.25	0.26
77	1.27	0.24	78	1.29	0.21
79	1.31	0.19	80	1.17	0.38
81	1.19	0.35	82	1.17	0.40
83	1.19	0.38	84	1.22	0.35
85	1.24	0.33	86	1.27	0.31
87	1.30	0.26	88	1.33	0.21
89	1.19	0.39	90	1.22	0.38
91	1.19	0.41	92	1.22	0.40
93	1.24	0.38	94	1.27	0.36
95	1.30	0.34	96	1.31	0.31
97	1.33	0.29	98	1.34	0.26
99	1.36	0.23	100	1.21	0.43
101	1.24	0.42	102	1.27	0.40
103	1.33	0.37	104	1.35	0.31
105	1.38	0.25	106	1.23	0.45
107	1.26	0.44	108	1.30	0.42
109	1.33	0.41	110	1.37	0.40
111	1.37	0.37	112	1.38	0.34
113	1.33	0.30	114	1.40	0.27
115	1.25	0.46	116	1.32	0.45
117	1.40	0.43	118	1.41	0.36
119	1.42	0.32	120	1.43	0.29
121	1.27	0.48	122	1.31	0.48
123	1.35	0.47	124	1.39	0.46
125	1.43	0.46	126	1.44	0.42
127	1.44	0.38	128	1.45	0.34
129	1.45	0.30	130	1.46	0.37
131	1.46	0.33	132	1.29	0.50
133	1.38	0.49	134	1.47	0.49
135	1.47	0.45	136	1.47	0.40
137	1.47	0.36	138	1.48	0.32
139	1.49	0.39	140	1.49	0.35
141	1.31	0.52	142	1.36	0.52
143	1.41	0.52	144	1.45	0.52
145	1.50	0.52	146	1.50	0.47
147	1.50	0.43	148	1.50	0.38
149	1.50	0.34	150	1.12	0.35
151	1.14	0.34	152	1.14	0.37
153	1.16	0.39	154	1.18	0.41
155	1.18	0.39			

M A T E R I A U E T N O E U D S D E S E L E M E N T S

ELEM. MAT. N° ET NO. DES NOEUDS DE L'ELEMENT

1	1	8	1	2	3	13	23	22	21	12
2	1	8	3	4	5	14	25	24	23	13
3	1	6	5	6	7	15	25	14		
4	1	6	25	26	27	16	7	15		
5	1	6	7	8	9	11	17	10		
6	1	6	9	18	29	20	17	11		
7	1	6	27	28	29	20	17	19		
8	1	6	7	16	27	19	17	10		
9	1	8	21	22	23	31	38	37	36	30
10	1	8	23	24	25	32	40	39	38	31
11	1	8	25	26	27	33	42	41	40	32
12	1	6	27	28	29	34	42	33		
13	1	6	42	43	44	35	29	34		
14	1	6	36	37	38	47	53	46		
15	1	6	51	52	53	46	36	45		
16	1	8	38	39	40	48	55	54	53	47
17	1	8	40	41	42	49	57	56	55	48
18	1	8	42	43	44	50	59	58	57	49
19	1	6	51	52	53	61	63	60		
20	1	6	53	64	73	70	63	61		
21	1	6	71	72	73	70	63	69		
22	1	6	51	60	63	151	62	150		
23	1	6	53	54	55	66	75	65		
24	1	6	73	74	75	65	53	64		
25	1	8	55	56	57	67	77	76	75	66
26	1	8	57	58	59	68	79	78	77	67
27	1	6	71	80	83	155	82	153		
28	1	6	73	84	93	90	83	81		
29	1	6	91	92	93	90	83	89		
30	1	6	71	82	91	89	83	80		
31	1	6	73	74	75	85	93	84		
32	1	6	93	94	95	86	75	85		
33	1	8	75	76	77	87	97	96	95	86
34	1	8	77	78	79	88	99	98	97	87
35	1	6	91	92	93	101	106	100		
36	1	6	106	107	108	102	93	101		
37	1	8	93	94	95	103	110	109	108	102
38	1	8	95	96	97	104	112	111	110	103
39	1	8	97	98	99	105	114	113	112	104
40	1	8	106	107	108	116	123	122	121	115
41	1	8	108	109	110	117	125	124	123	116
42	1	8	110	111	112	118	127	126	125	117
43	1	6	112	113	114	120	129	119		
44	1	6	112	118	127	128	129	119		
45	1	8	121	122	123	133	143	142	141	132
46	1	8	123	124	125	134	145	144	143	133
47	1	6	125	126	127	136	147	135		
48	1	6	145	146	147	135	125	134		
49	1	6	127	128	129	131	137	130		
50	1	6	129	138	149	140	137	131		
51	1	6	139	147	148	149	140	137		
52	1	6	130	127	136	147	139	137		
53	1	6	62	151	63	69	71	152		
54	1	6	82	155	83	29	91	154		

DEGRES DE LIBERTE IMPOSES

D.L. fixe = 1 D.L. libre = 0

NOEUD	Ux/r	Uy/z
5	0	0
6	1	1
7	1	1
8	1	1
9	1	1
145	0	0
146	1	1
147	1	1
148	1	1
149	1	1

PROPRIETES DES MATERIAUX

MAT.	E	NU	RHO	Ex/r	Ey/z
1	56.8E+03	0.40	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00

DEPLACEMENTS DES NOEUDS ANALYSE AXISYMETRIQUE

NOEUD	Depl. R	Depl. Z	NOEUD	Depl. R	Depl. Z
1	.339E-02	.917E-04	2	.217E-02	.218E-03
3	.112E-02	.340E-03	4	.305E-03	.313E-03
5	.164E-04	.207E-03	6	.000E+00	.000E+00
7	.000E+00	.000E+00	8	.000E+00	.000E+00
9	.000E+00	.000E+00	10	.711E-04	-.132E-03
11	.184E-03	-.255E-03	12	.395E-02	-.509E-03
13	.175E-02	-.184E-03	14	.145E-03	.307E-04
15	.163E-03	-.166E-03	16	.260E-03	-.277E-03
17	.459E-03	-.450E-03	18	.105E-02	-.185E-02
19	.774E-03	-.719E-03	20	.120E-02	-.161E-02
21	.451E-02	-.120E-02	22	.344E-02	-.110E-02
23	.245E-02	-.882E-03	24	.153E-02	-.608E-03
25	.684E-03	-.339E-03	26	.803E-03	-.620E-03
27	.107E-02	-.982E-03	28	.143E-02	-.165E-02
29	.162E-02	-.312E-02	30	.510E-02	-.197E-02
31	.324E-02	-.179E-02	32	.161E-02	-.107E-02
33	.206E-02	-.202E-02	34	.232E-02	-.282E-02
35	.231E-02	-.405E-02	36	.570E-02	-.282E-02
37	.472E-02	-.300E-02	38	.402E-02	-.288E-02
39	.338E-02	-.262E-02	40	.271E-02	-.221E-02
41	.289E-02	-.268E-02	42	.308E-02	-.321E-02
43	.313E-02	-.389E-02	44	.302E-02	-.481E-02
45	.637E-02	-.387E-02	46	.538E-02	-.417E-02
47	.475E-02	-.413E-02	48	.383E-02	-.360E-02
49	.405E-02	-.437E-02	50	.372E-02	-.547E-02
51	.725E-02	-.521E-02	52	.616E-02	-.560E-02
53	.554E-02	-.553E-02	54	.515E-02	-.532E-02
55	.485E-02	-.503E-02	56	.491E-02	-.520E-02
57	.490E-02	-.533E-02	58	.477E-02	-.553E-02
59	.440E-02	-.586E-02	60	.724E-02	-.646E-02
61	.628E-02	-.632E-02	62	.851E-02	-.756E-02
63	.730E-02	-.714E-02	64	.636E-02	-.684E-02
65	.596E-02	-.653E-02	66	.570E-02	-.619E-02
67	.555E-02	-.596E-02	68	.502E-02	-.598E-02
69	.870E-02	-.835E-02	70	.729E-02	-.718E-02
71	.636E-02	-.101E-01	72	.894E-02	-.748E-02
73	.671E-02	-.741E-02	74	.638E-02	-.702E-02

NOEUD	DEPL. R	DEPL. Z	NOEUD	DEPL. R	DEPL. Z
75	.612E-02	-.663E-02	76	.594E-02	-.637E-02
77	.582E-02	-.618E-02	78	.572E-02	-.601E-02
79	.545E-02	-.583E-02	80	.737E-02	-.104E-01
81	.604E-02	-.794E-02	82	.605E-02	-.100E-01
83	.652E-02	-.812E-02	84	.597E-02	-.698E-02
85	.588E-02	-.648E-02	86	.564E-02	-.612E-02
87	.564E-02	-.590E-02	88	.572E-02	-.539E-02
89	.559E-02	-.817E-02	90	.573E-02	-.691E-02
91	.391E-02	-.824E-02	92	.481E-02	-.672E-02
93	.490E-02	-.607E-02	94	.474E-02	-.551E-02
95	.451E-02	-.511E-02	96	.479E-02	-.520E-02
97	.503E-02	-.521E-02	98	.533E-02	-.510E-02
99	.568E-02	-.477E-02	100	.726E-02	-.698E-02
101	.328E-02	-.571E-02	102	.639E-02	-.170E-02
103	.308E-02	-.389E-02	104	.403E-02	-.429E-02
105	.535E-02	-.404E-02	106	.163E-02	-.506E-02
107	.209E-02	-.485E-02	108	.214E-02	-.407E-02
109	.203E-02	-.337E-02	110	.175E-02	-.165E-02
111	.226E-02	-.290E-02	112	.288E-02	-.319E-02
113	.370E-02	-.339E-02	114	.475E-02	-.325E-02
115	.917E-03	-.530E-02	116	.114E-02	-.323E-02
117	.711E-03	-.161E-02	118	.167E-02	-.207E-02
119	.261E-02	-.244E-02	120	.400E-02	-.245E-02
121	.312E-03	-.461E-02	122	.378E-03	-.346E-02
123	.349E-03	-.240E-02	124	.238E-03	-.148E-02
125	.161E-03	-.736E-03	126	.442E-03	-.77E-03
127	.676E-03	-.929E-03	128	.140E-02	-.141E-02
129	.307E-02	-.165E-02	130	.448E-03	-.807E-03
131	.145E-02	-.116E-02	132	-.255E-03	
133	-.240E-03	-.172E-02	134	-.162E-03	
135	.127E-03	-.245E-03	136	.249E-03	-.359E-03
137	.212E-03	-.384E-03	138	.177E-02	-.967E-03
139	.152E-03	-.233E-03	140	.198E-03	-.116E-03
141	-.768E-03	-.343E-02	142	-.722E-03	-.218E-02
143	-.633E-03	-.120E-02	144	-.534E-03	-.455E-03
145	-.466E-03	-.226E-04	146	.000E+00	.000E+00
147	.000E+00	.000E+00	148	.000E+00	.000E+00
149	.000E+00	.000E+00	150	.784E-02	-.622E-02
151	.805E-02	-.748E-02	152	.869E-02	-.893E-02
153	.768E-02	-.106E-01	154	.491E-02	-.917E-02
155	.649E-02	-.929E-02			

CONTRAINTES AUX NOEUDS DU MODELE ANALYSE AXISYMETRIQUE

NOEUD	Sig. R	Sig. Z	Tau RZ	Sig. T	Sig. 1	Sig. 2	Theta
1	-16.2	-101.2	-16.3	142.5	-13.2	-104.3	-10.5
2	16.4	-101.4	19.6	90.5	19.6	-104.6	9.2
3	4.0	-54.6	65.4	35.9	46.4	-97.0	32.9
4	-39.1	84.3	-18.4	36.3	86.9	-41.8	81.7
5	60.9	255.7	-145.3	116.0	333.2	-16.6	61.9
6	-107.4	-107.2	-59.0	-90.7	-48.3	-166.3	45.0
7	-449.5	-535.4	14.8	-403.4	-447.0	-537.8	9.5
8	-919.9	-1378.2	36.5	-921.7	-917.1	-1381.0	4.5
9	-1486.6	-3622.1	-1.2	-2041.1	-1486.6	-3622.1	.0
10	-543.4	-1033.8	179.3	-626.3	-484.8	-1092.3	18.1
11	-1012.7	-2795.2	183.7	-1511.7	-993.9	-2813.9	5.8
12	-36.2	-162.4	-101.8	138.1	20.5	-219.1	-29.1
13	46.2	-265.6	30.5	6.4	51.1	-268.6	5.5
14	-28.4	-133.6	42.9	-57.1	-13.1	-148.9	19.6
15	-277.4	-545.9	147.0	-320.6	-212.6	-610.7	23.8
16	-284.2	-994.3	162.0	-495.6	-249.0	-1029.5	12.3
17	-376.3	-1847.5	309.9	-867.1	-313.6	-1910.1	11.4
18	-347.0	-2217.6	-600.2	-978.6	-171.0	-2393.6	-16.3
19	-8.6	-1508.5	266.4	-569.2	37.3	-1554.4	9.8
20	-55.9	-1333.9	-353.9	-499.2	35.6	-1425.4	-14.5
21	-78.1	-238.8	-189.1	118.6	47.0	-363.9	-33.5
22	3.9	-358.1	-113.0	46.7	36.3	-390.5	-16.0
23	106.8	-481.9	-11.2	-18.6	106.8	-482.1	-1.1
24	59.8	-482.0	119.6	-87.7	85.0	-507.2	11.9
25	-51.0	-488.1	226.3	-186.1	45.0	-564.1	23.0
26	-11.2	-896.8	220.7	-323.5	40.7	-948.7	13.2
27	94.8	-1342.5	241.5	-447.9	134.1	-1381.9	9.3
28	-134.7	-1332.6	-219.9	-518.1	-95.6	-1371.7	-10.1
29	-125.9	-788.3	-708.9	-284.0	325.4	-1239.6	-32.5
30	-208.6	-245.7	-263.0	81.0	27.4	-501.6	-41.9
31	130.6	-604.4	-143.8	-37.8	161.0	-679.8	-10.0
32	162.7	-774.5	111.0	-160.4	175.7	-787.5	6.7
33	221.5	-1253.0	57.9	-311.1	223.8	-1255.3	2.2
34	79.7	-1035.8	-285.1	-269.3	148.4	-1104.4	-13.5
35	-167.7	-563.6	-294.7	-183.8	-10.6	-720.7	-28.1
36	-311.5	-209.9	-390.9	83.6	133.4	-654.9	48.7
37	-139.7	-607.5	-325.9	-50.4	27.6	-774.8	-27.2
38	153.4	-792.0	-271.1	-44.6	226.3	-854.9	-15.1

NOEUD	SIG.R	SIG.Z	TAU RZ	SIG.T	SIG.1	SIG.2	THETA.
39	242.5	-872.3	-145.4	-78.0	281.1	-890.9	-7.3
40	330.2	-1029.0	-16.5	-140.9	330.4	-1029.2	-.7
41	349.4	-1071.6	-46.7	-144.4	350.9	-1073.1	-1.9
42	379.1	-1103.4	-83.7	-138.4	383.8	-1108.1	-3.2
43	157.0	-677.5	-115.7	-59.6	172.8	-693.3	-7.7
44	-68.2	-247.0	-143.3	17.1	11.3	-326.5	-29.0
45	-206.6	-356.1	-430.2	101.4	155.3	-718.0	-40.1
46	-230.6	-857.7	-387.7	-169.9	-51.0	-1067.3	-24.9
47	96.2	-1023.7	-301.8	-132.1	172.4	-1099.8	-14.2
48	333.0	-1074.8	-97.6	-107.9	339.7	-1081.5	-3.9
49	379.3	-902.6	-43.5	-16.2	380.7	-904.0	-1.9
50	112.5	50.1	67.0	237.0	155.2	7.5	32.5
51	-229.1	-875.7	-700.6	-78.8	219.2	-1324.0	-32.6
52	-400.2	-1577.3	-470.3	-479.2	-235.4	-1742.2	-19.3
53	84.0	-1454.6	-302.8	-275.7	141.4	-1512.0	-10.7
54	179.1	-1300.8	-216.4	-192.5	210.1	-1331.8	-8.2
55	351.7	-1178.4	-146.3	-67.9	375.4	-1192.1	-5.4
56	373.5	-957.8	-50.9	3.1	375.5	-959.7	-2.2
57	407.0	-707.5	31.6	114.2	407.9	-708.4	1.6
58	347.3	-192.3	149.3	280.4	385.9	-230.8	14.5
59	273.2	325.2	280.3	440.5	580.7	17.6	132.4
60	-593.5	-2039.7	-114.7	-686.5	-574.5	-2048.7	-4.5
61	137.5	-1524.2	126.7	-239.6	147.1	-1533.9	4.3
62	-1628.2	-4662.8	-1156.6	-2084.6	-1237.7	-5053.3	-18.7
63	-191.0	-2463.2	1135.1	-689.3	278.9	-2933.1	22.5
64	-1118.4	-1574.9	45.5	-770.7	-1113.9	-1579.4	5.6
65	-363.4	-1314.2	79.2	-385.9	-356.9	-1320.8	4.7
66	-113.3	-1063.1	97.7	-204.9	-103.3	-1073.1	5.8
67	202.4	-435.0	93.0	158.1	210.7	-446.3	8.1
68	429.1	448.8	416.3	573.2	555.4	22.5	134.3
69	-1562.7	-4814.1	762.7	-2124.1	-1392.7	-4984.2	12.6
70	-1753.1	-1459.5	1301.5	-922.4	-296.5	-2916.1	131.8
71	-4703.9	-5620.8	-1083.7	-3691.1	-3985.7	-6339.0	-33.5
72	-1540.6	-2377.3	1351.3	-1144.2	-544.3	-3373.5	36.4
73	-1595.8	-1043.1	517.1	-725.0	-733.1	-1905.8	120.9
74	-1270.6	-1207.6	333.2	-687.9	-905.5	-1574.6	132.4
75	-677.5	-724.6	339.0	-270.7	-361.3	-1041.0	43.0
76	-325.2	-391.3	219.8	-10.0	-135.9	-580.6	40.7
77	-31.3	-138.4	132.7	198.2	58.2	-227.9	34.0
78	278.2	210.3	325.7	450.5	571.8	-83.2	42.0
79	617.3	602.4	539.4	730.7	1149.3	70.5	44.6

NOEUD	SIG.R	SIG.Z	TAO RE	SIG.T	SIG.1	SIG.2	THETA
80	-3509.0	-1023.3	404.7	-1448.8	-959.1	-3573.3	99.0
81	-1181.4	-1756.0	860.5	-891.8	-574.9	-2402.5	35.2
82	-3475.8	-333.7	-1229.2	-1220.7	90.0	-3899.5	71.0
83	-2727.3	-590.2	1976.2	-1013.1	587.9	-3905.4	120.8
84	-1075.3	-686.5	33.1	-430.4	-683.7	-1078.1	94.8
85	-1131.6	-342.6	216.1	-325.2	-287.3	-1187.0	104.4
86	-1053.0	-131.8	160.2	-224.1	-104.8	-1080.0	99.6
87	-377.4	116.5	122.7	139.4	145.3	-406.2	103.2
88	521.7	466.3	459.3	637.4	954.2	33.9	43.3
89	-2055.9	-716.7	702.4	-847.8	-415.9	-2356.7	113.2
90	-2557.1	-765.5	660.1	-1060.1	-548.6	-2774.0	108.2
91	-664.4	-50.5	-238.3	-87.7	31.2	-746.0	71.1
92	-1830.5	-352.6	-369.8	-654.7	-265.2	-1917.8	76.7
93	-1797.6	80.2	-79.7	-457.0	83.6	-1890.0	87.6
94	-1523.9	107.3	-22.8	-354.0	107.6	-1524.2	89.2
95	-1282.8	363.4	-13.1	-167.6	363.5	-1282.9	89.5
96	-994.4	351.4	41.9	-46.6	352.7	-995.7	91.8
97	-706.0	316.0	79.0	75.8	351.9	-711.8	94.3
98	-123.4	363.0	209.1	325.9	440.5	-201.0	110.3
99	443.1	359.4	365.5	562.0	769.2	33.4	41.7
100	140.4	-33.9	-270.7	172.9	337.7	-231.1	-36.1
101	-1015.9	-169.9	-337.6	-322.9	-51.7	-1134.1	70.7
102	-1132.4	203.8	-204.5	-215.5	234.4	-1163.0	81.5
103	-1168.2	324.3	14.4	-204.6	324.4	-1168.3	90.6
104	-933.3	415.5	-1.7	-38.6	415.5	-933.3	90.0
105	193.2	195.7	167.5	373.1	362.4	27.5	134.7
106	91.4	-225.7	-313.1	23.0	283.9	-418.1	-31.6
107	-524.8	-131.6	-268.3	-174.1	4.4	-660.9	63.1
108	-762.4	164.8	-229.3	-145.4	218.4	-816.0	76.8
109	-830.7	250.4	-74.4	-151.1	255.5	-935.8	86.1
110	-1074.1	308.3	95.5	-238.1	314.9	-1080.7	93.9
111	-1121.0	410.8	35.5	-192.8	411.6	-1121.9	91.3
112	-1179.0	467.6	-44.5	-171.7	468.8	-1180.2	88.5
113	-654.4	231.1	-39.1	-16.6	232.8	-656.2	87.5
114	-85.6	12.7	-29.7	164.6	21.0	-93.9	74.4
115	-45.9	-110.3	-152.9	-15.9	78.1	-234.3	-39.0
116	-596.4	119.1	-88.4	-138.1	129.9	-607.1	83.1
117	-612.7	145.9	150.0	-154.1	174.5	-641.3	100.8
118	-1327.4	260.4	178.2	-361.9	280.1	-1347.1	96.3
119	-1070.0	93.2	-243.1	-283.9	141.9	-1118.8	78.7
120	-404.7	-93.1	-208.9	-45.3	11.6	-509.5	63.4

NDEUD	SIG.R	SIG.2	TAU R2	SIG.T	SIG.1	SIG.2	THETA
121	-144.2	-17.2	-78.8	-50.7	20.5	-181.9	64.4
122	-237.3	15.3	-34.9	-75.5	20.0	-242.0	82.3
123	-344.0	66.9	39.4	-99.1	70.6	-347.8	95.4
124	-280.7	2.6	122.5	-107.6	47.4	-332.4	110.1
125	205.6	-114.4	169.3	-124.3	15.3	-335.4	127.5
126	-704.1	-118.5	244.9	-314.7	-29.6	-793.0	110.0
127	-1164.1	49.5	265.0	-426.4	104.8	-1219.5	101.8
128	-1119.2	73.4	-236.1	-360.1	118.4	-1164.3	79.2
129	-715.8	-93.8	-627.7	-214.8	295.7	-1105.3	58.2
130	-1635.1	-446.6	389.3	-814.7	-330.4	-1751.3	106.6
131	-1184.8	-93.7	-231.4	-453.1	-46.6	-1231.9	78.5
132	-80.2	-9.2	-34.6	-46.1	4.9	-94.3	67.6
133	-80.6	20.4	37.9	-32.3	33.1	-93.2	108.4
134	5.8	-21.1	-5.1	-10.9	6.7	-22.0	-10.4
135	-371.8	-214.3	168.8	-229.5	-106.7	-479.3	122.5
136	-531.7	-1.7	126.4	-221.0	24.6	-608.1	101.6
137	-1697.7	-663.0	350.2	-937.5	-555.6	-1805.1	107.6
138	-2290.9	-448.7	-517.1	-1031.7	-313.5	-2426.2	75.3
139	-1544.2	-1176.6	378.7	-1087.3	-939.5	-1781.3	122.1
140	-2278.3	-921.0	70.6	-1273.3	-917.3	-2281.9	93.0
141	-5.9	-2.1	2.2	-38.1	-1.1	-7.0	114.7
142	67.6	4.6	21.2	-3.0	74.1	-1.2	17.0
143	170.5	-4.7	42.6	37.8	180.3	-14.5	13.0
144	147.5	-21.2	-39.9	27.8	156.5	-30.2	-12.7
145	247.7	89.3	-169.7	119.7	355.8	-18.7	-32.5
146	15.6	-16.6	-4.3	-3.3	16.1	-17.2	-7.5
147	-729.7	-417.1	231.7	-456.0	-293.9	-852.9	118.0
148	-408.3	-179.7	300.4	-239.7	27.4	-615.4	124.6
149	-2823.6	-1024.1	-1.5	-1534.3	-1024.1	-2823.6	90.0
150	18.6	-1837.5	-926.3	-337.8	398.5	-2239.4	-22.3
151	-622.2	-3645.6	71.4	-1302.4	-620.5	-3647.2	1.4
152	-4459.5	-7297.1	-1282.7	-4262.6	-3965.7	-7790.9	-21.1
153	-6950.9	-4265.8	-1237.9	-4117.6	-3782.1	-7434.5	68.7
154	-783.8	561.6	-565.4	155.6	770.3	-992.4	69.9
155	-3094.5	199.9	578.0	-845.5	298.4	-3193.0	99.7

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00257253 3