

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	13
1.1 Introduction.....	13
1.2 État de l'art sur les travaux antérieurs dans le domaine de l'étanchéité	13
1.2.1 Revue de la littérature sur la procédure d'éclatement à chaud (HOBT)...	13
1.2.1.1 Historique de la procédure des tests d'éclatement à chaud (HOBT).....	14
1.2.1.2 Études numériques	16
1.2.2 Revue de la littérature sur la mesure du coefficient d'expansion thermique	18
1.2.2.1 Le coefficient d'expansion thermique	18
1.2.2.2 Facteurs influençant le coefficient d'expansion thermique	23
1.2.3 Études du fluage-relaxation	26
1.2.4 Objectifs du projet.....	31
CHAPITRE 2 BANCS D'ESSAI EXPÉRIMENTAUX ET PROCÉDURES D'ESSAIS.....	33
2.1 Amélioration du banc d'essai HOBT	33
2.1.1 Généralité	33
2.1.2 Présentation du montage HOBT amélioré	34
2.1.3 L'amélioration apportée sur le banc d'essai HOBT	35
2.1.4 Description du montage HOBT	36
2.1.4.1 L'assemblage brides-joints-boulons	36
2.1.4.2 Système de pressurisation.....	38
2.1.4.3 Système de chauffage	39
2.1.4.4 Système d'acquisition de données	40
2.1.5 Caractéristiques techniques du montage	40
2.1.6 Fonctionnement du banc d'essai.....	41
2.2 Mesure du coefficient d'expansion thermique.....	42
2.2.1 Introduction.....	42
2.2.2 Description du banc d'essai TECT	43
2.2.3 Caractéristiques du montage TECT	46
2.2.4 Contexte général	46
2.2.5 Fonctionnement du montage TECT	48
2.3 Essais expérimentaux.....	49
2.3.1 Introduction.....	49
2.3.2 Essais sur le montage HOBT	50
2.3.2.1 Les différents joints testés.....	51
2.3.2.2 Programmes des tests	51
2.3.2.3 Procédure expérimentale.....	52
2.3.3 Les essais réalisés sur le montage TECT	53

2.3.3.1	Les différents joints testés.....	54
2.3.3.2	Description du programme d'essais.....	54
2.3.3.3	Procédure expérimentale TECT	55
2.4	Présentation des différents calculs du paramètre	57
2.4.1	Calcul de la perte de charge dans les boulons.....	57
2.4.2	Calcul du taux de compression du joint au serrage.....	60
2.4.3	Calcul du taux de fluage et de relaxation.....	60
2.4.4	Calcul du coefficient d'expansion thermique	61
CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET ANALYSE		63
3.1	Introduction.....	63
3.2	Résultats des Tests TECT	63
3.2.1	Effet de la contrainte sur le joint.....	63
3.2.1.1	Joint rigide	64
3.2.1.2	Joint mou.....	67
3.2.2	Effet de la rigidité du matériau	71
3.2.3	Effet de la température.....	73
3.2.3.1	Joints rigides	74
3.2.3.2	Joints mous.....	76
3.2.4	Effet du nombre de cycles de chauffage	79
3.2.5	L'effet de la vitesse de chauffage	82
3.3	Résultats des essais HOBT	85
3.3.1	Les facteurs influençant les performances du joint.....	85
3.3.1.1	Effet de la contrainte initiale.....	85
3.3.1.2	Effet du nombre de cycles de chauffage-refroidissement.....	90
3.3.1.3	L'effet de la pression interne	94
3.3.1.4	L'effet du maintien de la température.....	97
3.3.2	Effet du type de joint.....	101
3.3.2.1	Joint métalloplastique	104
3.3.2.2	Joints mous.....	108
3.3.2.3	Joints rigides	114
3.3.3	Effet de l'épaisseur du joint	120
3.4	Analyse comparative des résultats avec les deux procédures HOBT et TECT	125
3.4.1	Taux d'écrasement du joint.....	126
3.4.2	Taux de fluage-relaxation	127
3.4.3	Le coefficient d'expansion thermique	127
3.4.4	La température de transition vitreuse.....	128
CONCLUSION.....		129
RECOMMANDATIONS		133
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		135

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 0.1	Principales caractéristiques des polymères PTFE.....	7
Tableau 1.1	Coefficient d'expansion du téflon.....	19
Tableau 1.2	Caractéristiques thermiques et mécaniques de quelques joints en PTFE Tiré d'EPRI (2001).....	28
Tableau 2.1	Paramètres et caractéristiques du montage HOBT	40
Tableau 2.2	Groupe de familles de joints testés par la procédure HOBT	51
Tableau 2.3	Ensemble des tests réalisés sur le banc d'essai HOBT	52
Tableau 2.4	Groupe des familles de joints testés avec le montage TECT	54
Tableau 2.5	Première série de tests.....	55
Tableau 2.6	Deuxième série des tests	55
Tableau 3.1	Calculs d'épaisseur aux différentes étapes du test pour les 4 familles des joints	70
Tableau 3.2	Paramètres calculés pour les 2 familles de joints.....	71
Tableau 3.3	Évaluation du CET.....	85
Tableau 3.4	Les caractéristiques des joints à différents niveaux de contraintes.....	87
Tableau 3.5	Récapitulation des caractéristiques mécaniques et thermiques	89
Tableau 3.6	Caractéristiques du joint sous l'effet de la pression interne	95
Tableau 3.7	Caractéristiques du joint sous l'effet de la pression interne	96
Tableau 3.8	Caractéristiques du joint selon le type de test.....	98
Tableau 3.9	Tableau récapitulatif des caractéristiques	99
Tableau 3.10	Valeurs récapitulatives des caractéristiques mécaniques et thermiques ..	106
Tableau 3.11	Valeurs récapitulatives des caractéristiques mécaniques et thermiques ..	107
Tableau 3.12	Déformation des quatre types de joints mous	110

Tableau 3.13	Valeurs récapitulatives des caractéristiques mécaniques et thermiques ..	111
Tableau 3.14	Valeurs récapitulatives des caractéristiques mécaniques.....	118
Tableau 3.15	Valeurs récapitulatives des caractéristiques mécaniques.....	119
Tableau 3.16	Valeurs récapitulatives des caractéristiques mécaniques.....	124
Tableau 3.17	Valeurs récapitulatives des caractéristiques mécaniques et thermiques ..	125
Tableau 3.18	Comparaison du taux d'écrasement avec deux procédures	126
Tableau 3.19	Valeurs comparatives du taux d'écrasement du joint par les deux	127
Tableau 3.20	Comparaison du coefficient d'expansion thermique par les deux	127
Tableau 3.21	Comparaison de la température de transition vitreuse par les trois Procédures.....	128

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1	Vue d'une installation utilisant un assemblage boulonnées
Figure 0.2	Schéma des différents types de brides
Figure 0.3	Les différentes catégories de joints.....
Figure 0.4	Structure du PTFE.....
Figure 0.5	L'éclatement du joint provoquant une fuite de la vapeur sous pression
Figure 1.1	Type de procédure du test HOBT
Figure 1.2	Coefficients d'expansion du Téflon.....
Figure 1.3	Comparaison de l'expansion d'échantillons en Téflon.....
Figure 1.4	Variation de l'expansion thermique linéaire.....
Figure 1.5	Méthodes pour déterminer la température de transition vitreuse.....
Figure 1.6	L'expansion linéaire du PTFE
Figure 1.7	Changement de : (a) L'expansion thermique linéaire vs T° et (b) L'épaisseur.....
Figure 1.8	Étapes principales du fluage
Figure 1.9	Le taux de compressibilité suivant le type de joint.....
Figure 1.10	Courbe Contrainte-Déformation en fonction du matériau.....
Figure 1.11	L'effet de la contrainte et du nombre de cycles sur l'accumulation de déformation
Figure 2.1	Quelques exemples d'utilisation des assemblages sous pression
Figure 2.2	Vue du montage HOBT
Figure 2.3	Montage des LVDT
Figure 2.4	Les éléments constituant l'assemblage boulonné HOBT

Figure 2.5	Système de mesure de la tension sur les boulons	38
Figure 2.6	Système de pressurisation	39
Figure 2.7	Les éléments composant le système de chauffage	39
Figure 2.8	Schéma synoptique du banc HOBT	42
Figure 2.9	Vue du montage TECT	44
Figure 2.10	Montage TECT avec casque d'isolation : a) Les brides b) Les extensomètres.....	45
Figure 2.11	Principales composantes du montage TECT	45
Figure 2.12	Schéma synoptique du banc d'essai TECT.....	48
Figure 2.13	Facteurs influençant la force de serrage.....	58
Figure 2.14	Forces agissantes sur le joint.....	59
Figure 3.1	Effet de la contrainte sur l'épaisseur du joint C.....	64
Figure 3.2	Effet de la contrainte sur le fluage du joint C	65
Figure 3.3	Effet de la contrainte sur la relaxation du joint C	65
Figure 3.4	Effet de la contrainte sur la variation du CET (joint C).....	66
Figure 3.5	Détermination de la température de transition (joint C)	67
Figure 3.6	Effet de la contrainte sur l'épaisseur du joint A1	67
Figure 3.7	Effet de la contrainte sur l'évolution du fluage du joint A1	68
Figure 3.8	Effet de la contrainte sur la relaxation du joint A1	68
Figure 3.9	Effet de la contrainte sur l'expansion thermique du joint A1	69
Figure 3.10	Effet de la contrainte sur la température de transition du joint A1	69
Figure 3.11	L'évolution du fluage pour des matériaux rigides et mous.....	72
Figure 3.12	L'évolution du CET pour des matériaux rigides et mous	72
Figure 3.13	Détermination de la température de transition vitreuse $T^{\circ}g$ pour les matériaux mous et rigides	73

Figure 3.14	Effet de température sur l'épaisseur du joint	74
Figure 3.15	Effet de température sur le fluage du joint.....	74
Figure 3.16	Effet de température sur la relaxation du joint.....	75
Figure 3.17	Effet de température sur le coefficient d'expansion thermique du joint...75	
Figure 3.18	La température de transition sous l'effet de température.....	76
Figure 3.19	Effet de la température sur l'épaisseur du joint	76
Figure 3.20	Effet de la température sur l'évolution du fluage du joint A1	77
Figure 3.21	Effet de la température sur l'évolution de la relaxation du joint A1	77
Figure 3.22	Effet de la température sur l'expansion thermique du joint.....	78
Figure 3.23	Détermination de la température de transition sous l'effet de température.....	78
Figure 3.24	Effet des cycles sur l'épaisseur du joint.....	79
Figure 3.25	Effet des cycles sur la variation du fluage	80
Figure 3.26	Effet des cycles sur la relaxation du joint	80
Figure 3.27	Effet des cycles sur la variation du coefficient d'expansion.....	81
Figure 3.28	Détermination de la température de transition sous l'effet des cycles.....	81
Figure 3.29	Effet de la vitesse de chauffage sur l'épaisseur du joint.....	82
Figure 3.30	Effet de la vitesse de chauffage sur le fluage.....	83
Figure 3.31	Effet de la vitesse de chauffage sur la relaxation.....	83
Figure 3.32	Effet de la vitesse de chauffage sur l'évolution de l'expansion thermique	84
Figure 3.33	La température de transition sous l'effet de la vitesse de chauffage	84
Figure 3.34	Impact de la contrainte sur l'évolution du fluage	86
Figure 3.35	L'effet de la contrainte sur la déformation cumulée	87
Figure 3.36	Effet de la contrainte initiale sur la relaxation de la contrainte	88

Figure 3.37	Effet de la contrainte initiale sur la chute de contrainte.....	88
Figure 3.38	Relation entre la charge dans les boulons et l'écrasement du joint	90
Figure 3.39	Effet du nombre de cycles de chauffage sur la déformation cumulée : Effet de Rochet	91
Figure 3.40	Variation du taux de déformation cumulée au cours des 20 cycles.....	91
Figure 3.41	La température et la contrainte de réserve sous l'effet de nombres de cycles.....	92
Figure 3.42	L'effet du cycle sur la chute de contrainte aux différentes étapes du test.....	93
Figure 3.43	L'influence des cycles sur la perte de charge dans les boulons.....	93
Figure 3.44	La variation de la rigidité au cours des 20 cycles	94
Figure 3.45	La température et la contrainte de réserve sous l'effet de la pression	95
Figure 3.46	Effet de la pression sur la chute de contrainte aux différentes étapes du test.....	96
Figure 3.47	Influence de la pression interne sur l'écrasement	97
Figure 3.48	Impact de maintien de température sur la déformation	98
Figure 3.49	Effet du maintien de température sur la chute de contrainte	99
Figure 3.50	La température et la contrainte de réserve sous l'effet du maintien de température.....	100
Figure 3.51	L'influence du maintien de température sur la déformation.....	101
Figure 3.52	Les deux types de joints métalloplastiques testés	102
Figure 3.53	Microstructure d'un joint mou	102
Figure 3.54	Vue des joints mous avant et après les tests	103
Figure 3.55	Microstructure d'un joint rigide.....	103
Figure 3.56	les trois types des joints rigides testés.....	104
Figure 3.57	Impact du type de joint sur l'évolution du fluage	105

Figure 3.58	L'effet du type de joint sur la déformation cumulée au cours des trois cycles.....	105
Figure 3.59	Détermination de la température et la contrainte de réserve.....	106
Figure 3.60	L'effet de type du matériau sur la chute de contrainte aux différentes étapes du test	107
Figure 3.61	Relation force écrasement de joints	108
Figure 3.62	Impact du type de matériau sur l'évolution de l'écrasement du joint lors du test HOBT sans cycles de chauffage-refroidissement	109
Figure 3.63	Effet du matériau sur l'écrasement du joint lors du test HOBT avec cycles de chauffage-refroidissement	109
Figure 3.64	La température et la contrainte de réserve sous l'effet du matériau du joint	110
Figure 3.65	L'effet du type de matériau sur la chute de contrainte.....	111
Figure 3.66	Relation force écrasement des joints.....	112
Figure 3.67	Coefficient d'expansion thermique des quatre types de joints mous en fonction de la température.....	112
Figure 3.68	Température de transition vitreuse des quatre types de joints	113
Figure 3.69	La température de transition vitreuse par DSC	113
Figure 3.70	Impact des types de joint rigides sur l'évolution du fluage	114
Figure 3.71	L'effet des types de joint rigides sur la déformation cumulée.....	115
Figure 3.72	La température et la contrainte de réserve sous l'effet de type du joint ..	116
Figure 3.73	L'effet du type des joints sur la chute de contrainte	116
Figure 3.74	Influence du type des joints rigides sur la déformation	117
Figure 3.75	La température de transition vitreuse sous l'effet de type du joint.....	118
Figure 3.76	La température de transition vitreuse par DSC	120
Figure 3.77	Impact de l'épaisseur sur évolution du fluage lors des cycles	121
Figure 3.78	Effet de l'épaisseur sur la déformation cumulé au cours des trois cycles de chauffage refroidissement	121

Figure 3.79	La température et la contrainte de réserve sous l'effet de l'épaisseur du joint	122
Figure 3.80	Effet de l'épaisseur sur la chute de contrainte	123
Figure 3.81	Influence de l'épaisseur sur la déformation	123
Figure 3.82	La température de transition vitreuse sous l'effet de l'épaisseur	124

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

Ag	Surface du joint (mm ²)
Ap	Surface annulaire pressurisée (mm ²)
Bi	Charge dans un boulon (KN)
E_C^{TA}	Épaisseur du joint comprimé (mm)
E_i	Épaisseur initiale du joint (mm)
E_g	Épaisseur du joint à une contrainte donnée (mm)
E_f	Épaisseur du joint final (mm)
F_j	Réaction du joint (MPa)
F_p	Force de pression (MPa)
P	Pression du fluide (MPa)
Sg	Contrainte sur le joint (MPa)
Tg	Température de transition vitreuse (°C)
T_i	Température initiale (°C)
T_f	Température finale (°C)
α	Coefficient d'expansion thermique (m/m/°C)

Acronymes

ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
CET	Coefficient d'expansion thermique
DSC	Differential Scan Calorimetry

ESA	European Sealing Association
FSA	Fluid Sealing Association
LVDT	Linear Voltage Differential Transformer
PEEK	PolyEtherEtherKetone
PID	Proportional integral derive
PTFE	PolytéTra-Fluoro-Éthylène
TMA	Thermo Mechanical Analyzer
TECT	Thermal Expansion Coefficient Test
HOBT	Hot Blow-out Test
TTRL	Tightness Testing and Research Laboratory
SDSL	Static and Dynamic Sealing Laboratory
UNC	Unified Coarse Thread, filet imperial à pas large

INTRODUCTION

Généralités

Les assemblages à brides boulonnées sont considérés comme l'ensemble des éléments d'un réservoir pressurisé, empêchant toute fuite du fluide sous pression interne vers l'atmosphère. Le joint d'étanchéité constitue l'élément principal de tous les assemblages boulonnés, ce qui attribue au choix de cet élément une grande importance pour assurer une étanchéité adéquate. Dans ce contexte, il apparaît que la conception des assemblages à brides boulonnées dépend de certaines caractéristiques mécaniques du joint, essentielles pour répondre aux exigences en matière de protection de l'environnement et de santé et sécurité des individus. Ces préoccupations mondiales envers les émissions fugitives font en sorte qu'il est nécessaire d'imposer des exigences et des normes de plus en plus sévères.



Figure 0.1 Vue d'une installation utilisant un assemblage boulonné

Les assemblages boulonnés sont les systèmes les plus utilisés dans les installations thermiques, pétrochimiques et nucléaires des principales industries, qui affrontent le

problème des fuites intolérables. Ces systèmes d'étanchéité permettent un raccordement des tuyauteries dans différentes installations fonctionnant dans des conditions de température et de pression très sévères, comme le montre la figure 0.1. Cette dernière est un exemple d'une installation utilisant les assemblages à brides boulonnées.

Généralités sur les assemblages à brides boulonnées

Avant d'aborder les points essentiels de cette partie, quelques définitions de base et remarques introducives seront nécessaires afin de mieux comprendre le sujet traité.

Un assemblage à brides boulonnées est un dispositif utilisé dans les systèmes pressurisés soumis à des cycles de pression et de température pendant de longues durées. Un assemblage à brides comprend trois éléments essentiels : les brides, le joint d'étanchéité et les boulons ou les goujons filetés. Les deux brides, superposées l'une sur l'autre, comportent des boulons répartis de façon uniforme. Le joint d'étanchéité est comprimé entre ces deux brides par le biais des boulons. Avec le temps, le joint soumis à des contraintes pendant des cycles de chauffage et de refroidissement se détériore, s'amincit et perd sa contrainte de compression, ce qui entraîne un éclatement du joint sous l'effet de la pression interne du fluide confiné dans le réservoir sous pression.

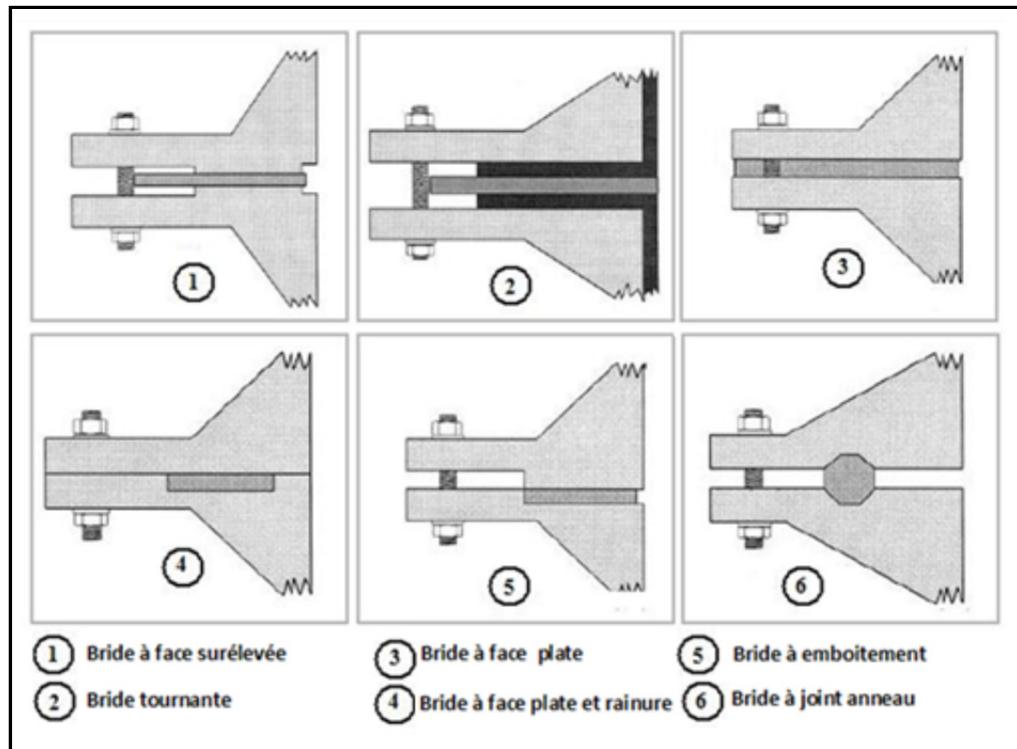
Les types de brides et de joints dans les assemblages à brides boulonnées

Voici les différents types de brides et de joints, tels qu'ils sont définis par FSA, ESA (1999) :

Les types de brides

La figure 01.2 montre les différents types de brides utilisés dans les réservoirs sous pression.

Voici une description de chaque type de bride :



1. La bride à face surélevée est la plus utilisée sur les réseaux de tuyauterie. Son nom vient du fait que les surfaces de contact des brides sont surélevées de façon à ce que le joint ne soit pas enfermé. Ce type de bride se caractérise par une dépose aisée du joint, sans démonter l'assemblage (Cas 1 de la figure 0.2).
2. La bride tournante constitue un ensemble de deux types de brides pouvant fonctionner dans toutes les directions. Elle s'apparente à la bride surélevée. On utilise ce type de bride lorsqu'une grande inertie est nécessaire, notamment dans le cas du verre et du plastique (Cas 2 de la figure 0.2).
3. La bride à face plate : dans ce type, les faces extérieures des brides sont simples et plates. Elles sont utilisées lorsque la bride doit être fabriquée dans un matériau fragile ou dans les applications à basse pression (Cas 3 de la figure 0.2).
4. La bride à emboîtement : connue aussi sous le nom de bride mâle-femelle, elle comporte une gorge où le joint s'installe en totalité. Elle convient aux joints rigides et permet le centrage des brides (Cas 5 de la figure 0.2).

5. La bride à face plate et rainure : dans ce cas, le joint est complètement enfermé. La rainure est conçue pour faire loger le joint. Ce type d'arrangement de brides avec contact métal-métal nécessite des joints élastiques et il est utilisé pour limiter l'écrasement du joint (Cas 4 de la figure 0.2).
6. La bride avec gorge pour joint anneau : dans cet arrangement, les brides comportent des gorges servant à loger le joint anneau, qui est généralement fabriqué en métal massif pour les applications à haute température (Cas 6 de la figure 0.2).

Les types de joints d'étanchéité

Les joints peuvent être classés en fonction de leur rigidité, donc du matériau qui les compose. Il existe trois types de joints :

- Les joints rigides (métalliques)
- Les joints semi-rigides ou métalloplastiques
- Les joints mous (non métalliques)

La figure 0.3 illustre les trois types de joints qui sont définis par la suite :

Les joints rigides (métalliques) : Figure 0.3 (a)

Ces joints conviennent bien aux applications où la pression et la température de service sont élevées. Ils sont réalisés en métal ou dans un mélange de métaux leur donnant une grande résistance. On peut citer les joints plats en acier inoxydable, en aluminium et en cuivre et les joints en anneaux métalliques.

Les joints semi-rigides ou métalloplastiques : Figure 0.3 (b)

Ce type de joint convient aux applications à basse ou haute pression et aux températures modérées. Ils sont fabriqués en matériaux métalliques, combinés de matériaux non métalliques. On peut citer les joints ondulés, encapsulés.

Les joints mous (non métalliques) : Figure 0.3 (c)

Ces types de joints sont habituellement fabriqués en matériaux composites. Ils sont souples et se destinent aux applications où la charge exercée est faible. Parmi les matériaux utilisés pour la fabrication de ces types de joints, on peut citer le PTFE, le graphite et les matériaux renforcés de fibres d'amiante, d'aramide, de carbone, de verre, de Kevlar et d'autres.

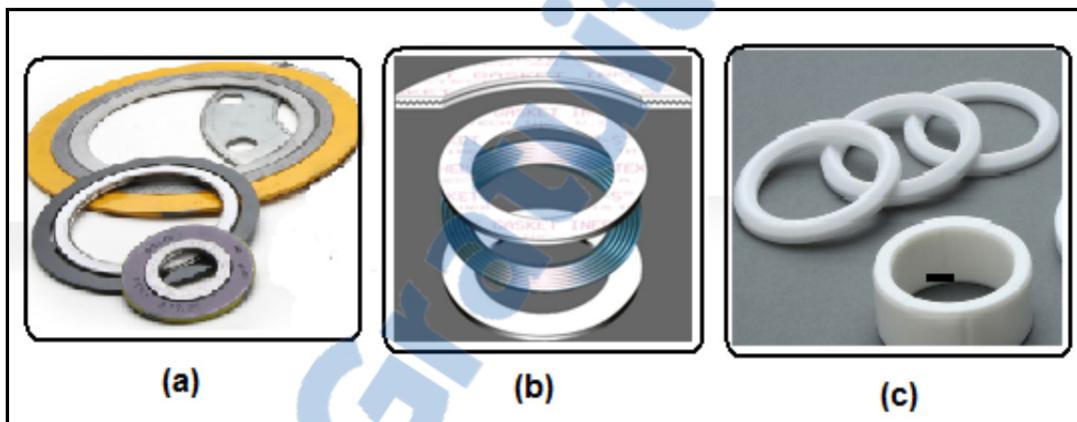


Figure 0.3 Les différentes catégories de joints
Adaptée de Able Seale & Design

Propriétés et caractéristiques des matériaux à base de PTFE

Dans la plupart des cas, un joint d'étanchéité se fabrique à partir de caoutchouc ou de polymère, ce qui le rend plus sensible à la déformation au cours du fluage-relaxation. Dans notre étude, plusieurs types de joints d'étanchéité à base de PTFE sont proposés. Mais il faut, en premier lieu, définir plus précisément ce polymère et connaître ses principales caractéristiques, de même que les propriétés des matériaux à base de PTFE.

Le polymère PTFE et ses caractéristiques

Le polytétrafluoroéthylène (PTFE) constitue un fluoropolymère issu du tétrafluoroéthylène. Ce polymère a été découvert par hasard en 1938 par le chimiste Plunkett (1910-1994), qui travaillait pour la société DuPont de Nemours. Il fut introduit commercialement en 1949.

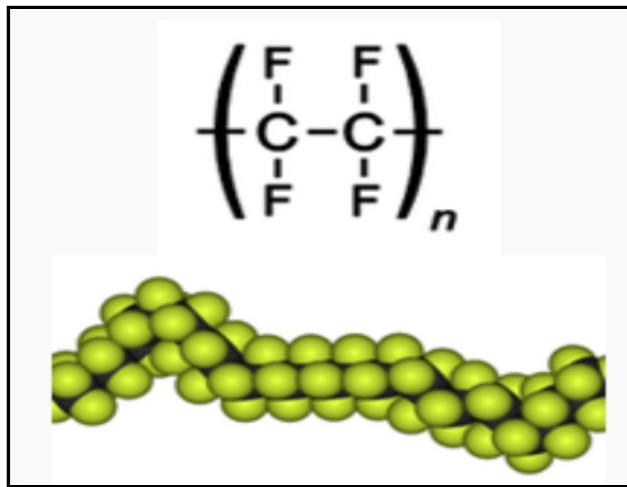


Figure 0.4 Structure du PTFE

Tirée de Wikipédia

Le PTFE est commercialisé sous les marques déposées suivantes : Téflon, Hostalen, Hostaflon ou Fluon. La marque la plus connue est Téflon, de DuPont (E.I. du Pont de Nemours et compagnie), et possède des propriétés remarquables, différentes des autres polymères thermoplastiques, notamment une excellente résistance thermique et chimique, ainsi qu'un coefficient de frottement extrêmement faible. La figure 0.4 montre la structure du PTFE.

Principales propriétés des polymères à base de PTFE

Chaque ensemble de polymères possède des propriétés distinctes l'un de l'autre. Les polymères fluorés se divisent en deux grandes classes, déterminées en fonction de leurs polarités, soit les polytétrafluoroéthylène (PTFE) et les polyfluorures de vinylidène (PVDF). Le tableau 0.1 décrit les différentes caractéristiques et les propriétés principales des PTFE et des PTFE renforcés.

Tableau 0.1 Principales caractéristiques des polymères PTFE
Adapté de Boedeker Plastics (2012)

Propriétés	PTFE	PTFE (chargé de 25 % de verre)	PTFE (chargé de 25 % de carbone)
Caractéristiques physiques			
Densité (g/cm ³)	2,16	2,25	2,08
Taux de cristallinité	80-90	----	----
Absorption d'eau, 24 heures (%)	< 0,01	0,02	0,05
Caractéristiques mécaniques			
Résistance à la traction (MPa)	0.027	0.0145	0.0131
Module de traction (MPa)	0.55	----	----
Élongation à la rupture (%)	300	270	75
Coefficient de Poisson	0,4	----	----
Caractéristiques thermiques			
Coefficient d'expansion thermique (x 10 ⁻⁵ /°C)	13.5	11.52	10.8
Température de déflection (°C)	55	65	65
Température de fusion (°C)	335	335	335
Température de transition vitreuse (°C)	123		
Température de service (°C)	260	260	260

Le PTFE peut être utilisé vierge ou chargé. Les chargements sont incorporés dans le but d'obtenir des caractéristiques optimales, telles que le frottement, la rigidité et le fluage. Différents types de renforts sont employés pour améliorer les caractéristiques du PTFE, comme le verre, le carbone, le graphite et le bronze. Le verre améliore la résistance à l'usure et la résistance chimique. L'ajout du carbone améliore la résistance à l'usure et au fluage et augmente la conductivité thermique. Le bronze, utilisé comme charge au PTFE, améliore la résistance à la compression et à l'usure, il augmente la conductivité thermique et abaisse le

fluage. L'ajout de graphite augmente quant à lui le coefficient de frottement, tout en améliorant la résistance au fluage.

Problématique

Dans tout système d'assemblage boulonné, le joint d'étanchéité constitue l'élément névralgique susceptible de produire une défaillance pendant le service. Cette défaillance entraîne en général des fuites des fluides sous pression. Lorsque le fluide utilisé est inflammable ou toxique, ces fuites sont intolérables pour l'environnement et l'humain. À cet effet, les mesures de prévention et les exigences imposées par les normes servant à protéger l'environnement et l'humain sont devenues plus sévères qu'auparavant. En effet, les nouvelles lois sur les émissions fugitives imposées par l'agence américaine EPA, le Ta-Luft en Allemagne et les accords de Kyoto exigent une performance élevée des assemblages étanches. Ainsi à travers le monde, les nouvelles normes de calcul et de conception des assemblages à brides boulonnés, munis de joints d'étanchéité (code ASME, EN15991), ont subi une amélioration considérable en matière de quantification et de prédition de fuite.

Certaines industries pétrochimiques, chimiques et autres utilisent les assemblages à brides boulonnées, munis de joints d'étanchéité à base de téflon; ceci nécessite une bonne connaissance des propriétés mécaniques de ce type de joint d'étanchéité, en particulier de sa résistance à l'éclatement en service. Une telle situation d'éclatement est généralement causée par la contraction relative due à la différence du coefficient d'expansion thermique entre le joint et la bride durant le refroidissement, tel qu'illustré par la Figure 0.5. De plus, les cycles de température produisent un changement cyclique de la contrainte sur le joint, lequel provoque un amincissement de l'épaisseur qui entraîne ensuite une perte de charge additionnelle de la boulonnerie. Ce phénomène de dommage constitue un cumul de déformations permanentes, connu sous le nom de l'effet de Rochet ou « racheting » en anglais.

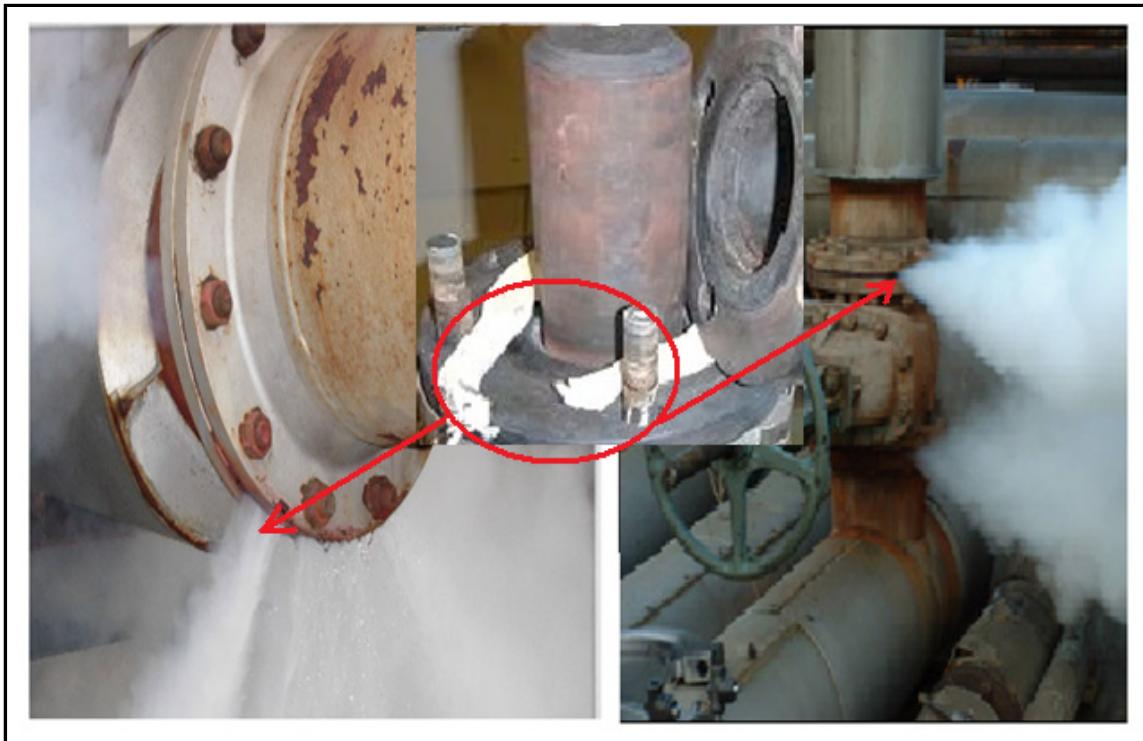


Figure 0.5 L'éclatement du joint provoquant une fuite de la vapeur sous pression

Objectifs de la recherche

Afin de surmonter les problèmes de fuites, il est très important d'améliorer une procédure d'essai expérimentale permettant l'évaluation des performances à l'éclatement des joints. En effet, une procédure d'éclatement de joint à chaud, connue sous le nom HOBT (Hot Blow-out Test), existe déjà. Celle-ci permet de déterminer la température de service d'un joint à ne pas dépasser, en se basant sur sa relaxation due au fluage dans une bride NPS 3 class 300. Les résultats obtenus concernant la relaxation de la contrainte sur le joint en fonction de la température, de même que les informations sur le point d'éclatement permettent de déterminer cette limite. Cependant, afin de bien évaluer celle-ci, plusieurs paramètres doivent être pris en considération. La contrainte initiale de serrage, la pression, la température, le taux de chauffage, le coefficient d'expansion thermique, le nombre de cycles de refroidissement et le temps de maintien de la température sont autant de paramètres à considérer. C'est justement ce qui constitue l'objectif principal de notre étude. Les résultats obtenus pourront avoir une incidence sur les projets de recherche et de développement en cours dans le

domaine de l'étanchéité des assemblages à brides boulonnées. Plus encore, nous espérons que notre étude contribuera à l'amélioration de la procédure d'essai d'éclatement à chaud (HOBT), laquelle est en voie d'adoption par le comité de normalisation F03 de l'ASTM.

C'est donc le banc d'essai d'éclatement à chaud (HOBT) qui servira de base pour améliorer la procédure d'éclatement de joint, en y introduisant les changements requis. La nouvelle procédure d'essai HOBT permet de prendre en compte les déformations permanentes cumulées et leur impact sur la réduction de la charge du joint. Cette amélioration est possible grâce à la mesure directe de la variation d'épaisseur du joint d'étanchéité lors des cycles thermiques. Plusieurs joints d'étanchéité à base de téflon sont proposés dans le cadre de notre recherche. Ces joints seront étudiés dans le but de généraliser le protocole modifié.

Les joints d'étanchéité à feuille, à base de polytétrafluoroéthylène (Téflon) et d'élastomère, sont très utilisés dans les assemblages à brides boulonnées, en particulier dans les installations chimiques où les explosions dues à la perte de charge excessive de la boulonnerie constituent une préoccupation majeure. La détermination de la température limite de service d'un joint en feuille nécessite une bonne connaissance de sa capacité de résistance à la dégradation due à l'exposition à la chaleur et au fluage à court et à long terme. Plusieurs types de joints seront testés afin de couvrir une gamme représentative de joints permettant de justifier la généralisation de la procédure modifiée.

Contenu du mémoire

Les principaux points abordés se résument en cinq étapes :

- Un survol de la littérature afin de brosser un tableau des études antérieures concernant la théorie et les expériences menées sur une variété de joints à base de téflon pour les applications à haute température.

- Mise au point du banc d'essai d'éclatement des joints (HOBT) déjà existant, incluant la calibration, la compensation en température et les ajustements mécaniques et électriques requis.
- Réalisation des essais de fluage sur le montage de mesure du coefficient d'expansion thermique (TECT).
- Réalisation des essais de détermination du coefficient d'expansion thermique (TECT), sous contrainte de certains joints.
- Établir et rédiger un protocole d'essai pour le banc d'essai d'éclatement des joints (HOBT) modifié, incluant les cycles thermiques.

Ce mémoire se divise en cinq chapitres. Le premier prend la forme d'une recherche bibliographique et vise à présenter les systèmes d'étanchéité et les travaux antérieurs effectués sur le sujet, en accordant une importance particulière aux études théoriques et expérimentales sur l'éclatement des joints à haute température. Ainsi, on y trouve une description du mécanisme d'éclatement des joints et des techniques de mesure des fuites, de même que du coefficient d'expansion thermique.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la mise au point du banc d'essai HOBT existant, incluant la calibration, la compensation en température et les ajustements mécaniques et électriques nécessaires. Il inclut également la description des différents éléments du banc d'essai HOBT amélioré, avec un aperçu de son fonctionnement. Le troisième chapitre présente les différentes composantes du montage (TECT) et donne une description détaillée de son fonctionnement.

Le quatrième chapitre se compose de deux parties : la première concerne la présentation des essais d'éclatement de plusieurs types de joints, incluant les cycles thermiques, en tenant compte des ajustements et des modifications requis. Elle expose aussi la procédure d'essai HOBT modifiée, dont les cycles thermiques. La seconde partie s'attarde aux essais de fluage sur le montage (TECT), aux essais de détermination du coefficient d'expansion thermique

sous charge de quelques joints, à la définition des différents paramètres qui seront mesurés, ainsi qu'à la procédure établie pour le banc d'essai TECT.

Le cinquième chapitre met en évidence les résultats obtenus en adaptant le montage HOBT modifié, ainsi que le montage TECT, afin de souligner comment ils ont contribué à la caractérisation de l'éclatement des joints d'étanchéité à base de téflon. En conclusion, nous présentons une synthèse des résultats pertinents obtenus et nous discutons de l'intérêt de poursuivre plus avant ces études dans des directions données.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Cette partie de notre étude présente des généralités et des définitions à propos des assemblages à brides boulonnées, pour ensuite faire un historique des applications et des travaux déjà réalisés dans le domaine de l'étanchéité. Cet historique est précisément scindé en quatre parties résumant le contenu de ce mémoire. La première s'intéresse aux recherches antérieures traitant de la caractérisation des joints à base de PTFE testés par le banc d'essai HOBT. La deuxième fournit des informations sur l'évolution du coefficient d'expansion thermique, ainsi que sur les techniques de mesure de ce dernier. Un résumé des travaux de recherches antérieures traitant du phénomène fluage-relaxation est présenté dans la troisième partie.

1.2 État de l'art sur les travaux antérieurs dans le domaine de l'étanchéité

Cette partie présente un historique des applications et des travaux déjà produits dans le domaine de l'étanchéité.

1.2.1 Revue de la littérature sur la procédure d'éclatement à chaud (HOBT)

Plusieurs recherches visent à analyser les paramètres qui caractérisent les joints à base de PTFE dans les conditions de service. Parmi ces références, quelques-unes sont pertinentes et serviront d'amorce pour bien comprendre les phénomènes traités lors de notre analyse expérimentale. Notre survol de la littérature et notre lecture attentive des travaux antérieurs en lien avec notre domaine de recherche nous permettent de diviser ces études en fonction de leurs aspects numériques ou expérimentaux.

1.2.1.1 Historique de la procédure des tests d'éclatement à chaud (HOBT)

Depuis plusieurs décennies, de nombreuses recherches ont visé l'analyse des caractéristiques des joints à base de PTFE dans les conditions de service. Leur but était de déterminer la marge sécuritaire pour prévenir l'éclatement des joints pendant les conditions préalables au démarrage et à l'arrêt du fonctionnement des assemblages sous pression.

Cette partie de la littérature expose un résumé décrivant les études ayant utilisé la procédure des tests d'éclatement à chaud des joints à base de PTFE. Dans ce contexte, une présentation sera effectuée, par ordre chronologique, en vue de mettre en évidence les travaux les plus importants.

La technologie d'étanchéité a connu un développement considérable depuis les années 1990. Avec l'apparition des normes exigeant la protection de l'environnement, des règles sévères ont été imposées aux entreprises concernées, allant de la restriction des émissions fugitives émises par des installations thermiques, pétrochimiques et nucléaires, à l'interdiction des joints à base d'amiante. Toutes les conditions ont alors été réunies pour donner naissance à des travaux de recherches servant à la caractérisation des joints à base de PTFE, qui ont contribué à la conception des brides boulonnées.

Dans leur projet de qualification des joints en PTFE, Payne *et al.* (1990) ont présenté une procédure qui sert à déterminer la marge de sécurité par des mesures indirectes, en se basant sur la mesure du fluage-relaxation.

Keyood (1992) a présenté un nouveau protocole visant à déterminer le facteur de sécurité afin d'éviter l'éclatement du joint, en se basant sur des mesures directes.

Les méthodes antérieures utilisées pour tester le matériau du joint sont insuffisantes et ne reflètent pas les conditions de service réel. Ainsi, Brian et Winter (1993) ont élaboré une

enquête énumérant les nouvelles méthodes développées par différents organismes nord-américains et européens.

En 1995, les résultats des essais réalisés au laboratoire TTRL (Tightness Testing and Research Laboratory) de l'école polytechnique de Montréal ont été présentés dans le rapport du projet de qualification du joint en PTFE (PTFE-GQP). Ces résultats ont permis de développer la nouvelle procédure, nommée « Test d'éclatement à chaud » HOBT (Hot Blow out Test), qui sert à mesurer la contrainte et la température de service, appelés « paramètres de réserve ».

Birembaut *et al.* (1997) ont présenté une comparaison entre les normes et procédures nord-américaines et européennes existantes.

Savage (1999) a mené une étude sur la caractérisation des joints à base de PTFE, fondée sur l'éclatement à chaud et dont le but était de vérifier les hypothèses du projet PTFE-GQP et de valider des mesures de la température de réserve de certains joints selon la procédure d'éclatement à chaud (HOBT).

Derenne *et al.* (1999), dans leur étude portant sur la mesure de la relaxation et du taux de fuite à court terme, ont utilisé deux procédures, HOBT1 et HOBT2, inspirées de la procédure originale. Le principe de la première méthode consiste à chauffer, sans pressuriser, le système jusqu'à la température cible, qui sera maintenue pendant une heure, et ensuite d'effectuer une pressurisation qui augmente graduellement jusqu'à l'éclatement du joint. Dans la deuxième méthode, le principe de fonctionnement est de chauffer sous une pression constante.

En 2001, Bouzid *et al.* ont mentionné, dans leurs études servant à prédire la température de réserve sous l'opération de joints en téflon, que l'épaisseur et la charge ont un effet majeur sur le coefficient d'expansion thermique et qu'une relaxation additionnelle de la charge est

causée par la différence de dilatation thermique entre le joint et les brides provoquant son éclatement. La figure 1.1 montre les étapes de la procédure d'éclatement à chaud (HOBT).

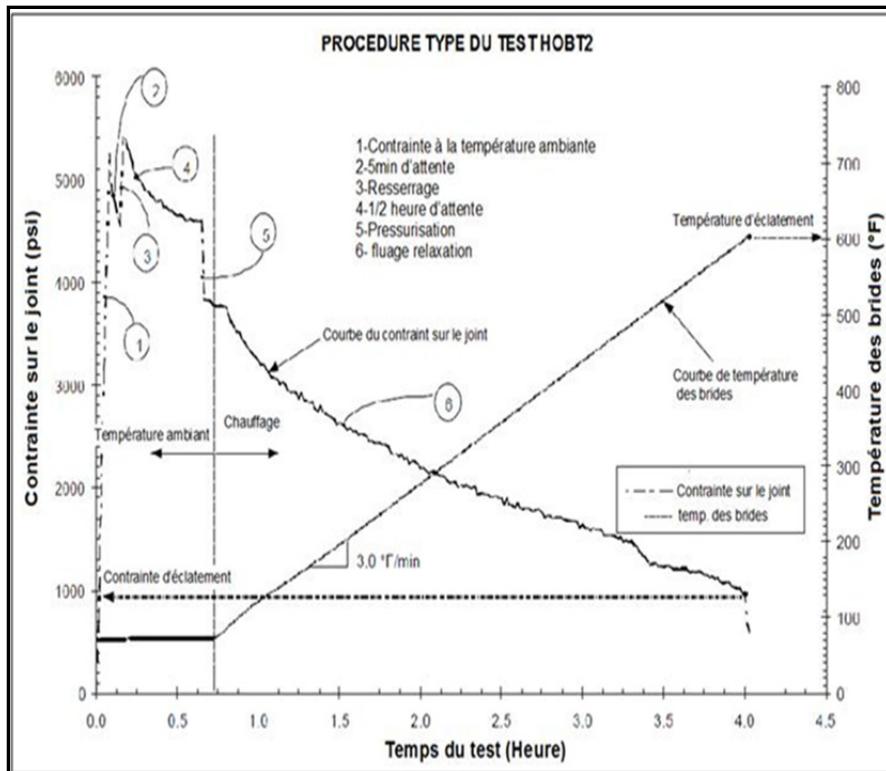


Figure 1.1 Type de procédure du test HOBT
Tirée de Derenne *et al.* (1999)

Cipolatti *et al.* (2004) ont présenté les résultats des tests effectués sur plusieurs types de joints, et ont montré qu'il existe une température critique au-delà de laquelle la fuite augmente de façon significative.

1.2.1.2 Études numériques

La conception des brides boulonnées nécessitant l'analyse par éléments finis correspond à un autre domaine où ces données s'avèrent d'une importance capitale. En effet, les concepteurs

utilisent souvent des données disponibles qui ne sont pas nécessairement représentatives de la situation réelle.

L'utilisation de la méthode des éléments finis s'est largement développée, au point de devenir un outil essentiel de validation des mesures et des résultats expérimentaux. Les joints d'étanchéité jouent un rôle important dans le maintien du niveau d'étanchéité requis pour les assemblages à brides boulonnées.

La structure non linéaire de ces joints conduit à une distribution non uniforme des contraintes de contact. Dans ce contexte, Krishna *et al.* (2007) ont démontré, dans une analyse en trois dimensions par éléments finis, l'effet de la répartition des contraintes de contact sur les performances d'étanchéité, même si la rotation des brides se trouve bien en dessous de la norme spécifiée par l'appendice S du code des réservoirs sous pression de l'ASME.

Hwang *et al.* (1994) ont aussi réalisé une analyse comparative entre un modèle d'éléments finis en 2D et un modèle d'éléments finis en 3D, à partir d'une bride boulonnée à haute pression. L'examen comprend une comparaison entre les deux modèles au niveau du chargement axisymétrique en 2D et en 3D.

Fukuoka *et al.* (2002) ont produit une approche numérique visant une plus large utilisation de la technique de préchauffage des boulons, afin d'élucider le mécanisme de serrage. Les effets de la résistance thermique de contact existant autour d'un joint boulonné ont également été pris en compte, en vue de l'obtention d'une meilleure précision dans les analyses numériques.

Pour étudier la résistance du joint et la capacité d'étanchéité sous pression interne et à différentes charges combinées, un modèle d'analyse comparative en trois dimensions non linéaires par éléments finis a été proposé par Abid *et al.* (2009), afin d'étudier le comportement des assemblages à brides avec et sans joints d'étanchéité, de même que leurs performances. Ce modèle a également été utilisé dans le but de déterminer les conditions de

fonctionnement dans les assemblages à brides pour différentes températures et pressions internes.

1.2.2 Revue de la littérature sur la mesure du coefficient d'expansion thermique

1.2.2.1 Le coefficient d'expansion thermique

Un survol de la littérature sur l'analyse de la dilatation thermique nous permet de constater que peu d'études se sont penchées sur la mesure du coefficient de dilatation thermique des joints d'étanchéité à base de polytétrafluoroéthylène sous contrainte. La plupart des mesures sont effectuées sans charge, tel que le décrivent plusieurs normes ASTM, à savoir les normes C832, E228, E831 et D696. En effet, la déformation des pores, l'extrusion sous chargement et la présence de résidus pour renforcer les propriétés physico-chimiques peuvent avoir une influence importante sur le coefficient d'expansion thermique du matériau de joint à base de téflon.

Au cours des années cinquante, un nombre limité de travaux ont traité de l'influence de la température sur l'expansion thermique des matériaux. Parmi ceux-ci, il faut noter ceux de Kirby (1956), qui a établi une procédure servant à déterminer la dilatation thermique linéaire de quatre échantillons de téflon.

Tableau 1.1 Coefficient d'expansion du téflon
Adapté de Kirby, (1956, p. 94)

Température (°C)	Coefficients d'expansion par °C
+25 à -190	96×10^{-4}
+25 à -150	96
+25 à -100	312
+25 à -40	180
+25 à 0	200
+25 à +50	124
25 à 100	124
25 à 150	135
25 à 200	151

Les résultats obtenus sont présentés sur un graphique illustrant l'expansion en fonction de la température (Figure 1.2) et dans un tableau énumérant les coefficients moyens de dilatation linéaire de 190 à 300 °C (Tableau 1.1).

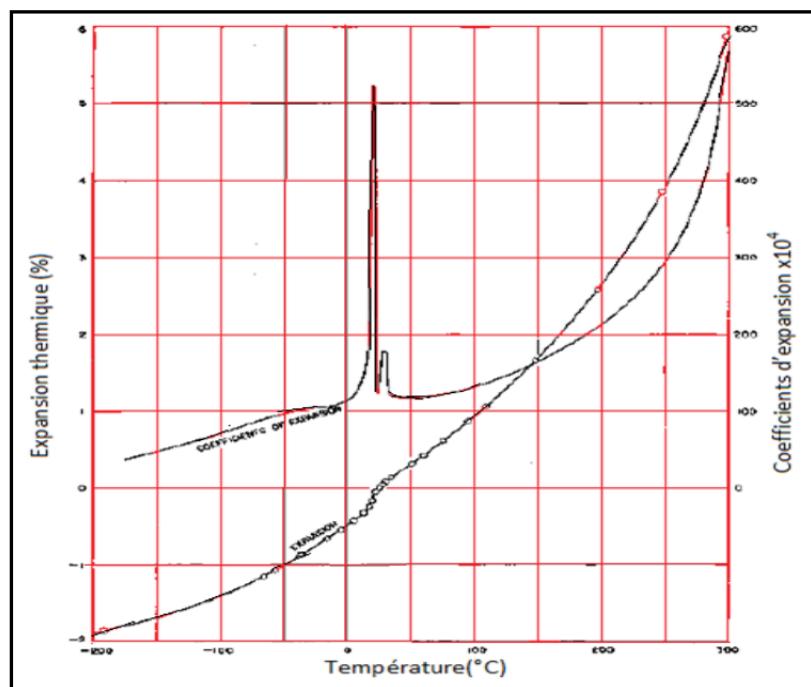


Figure 1.2 Coefficients d'expansion du Téflon
Adaptée de Kirby, (1956, p. 92)

Par ailleurs, les effets des contraintes internes résiduelles sur l'expansion du Téflon ont été étudiés par le même auteur, sont jugés considérables. Les transitions à 20 et 30 °C sont clairement mises en évidence dans la figure 1.3, qui présente les coefficients d'expansion en fonction de la température.

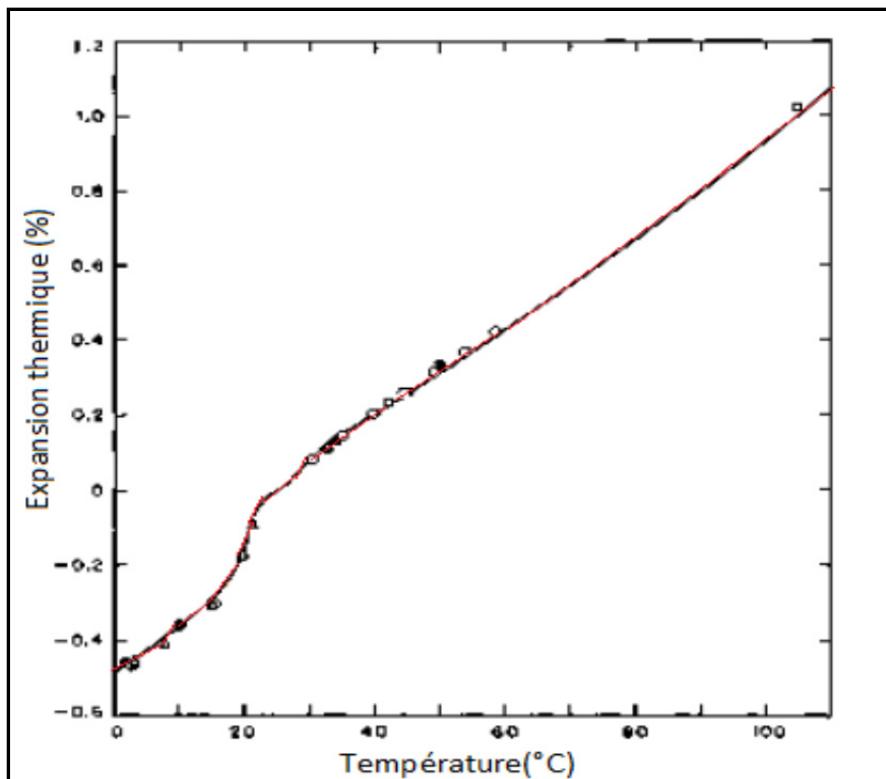


Figure 1.3 Comparaison de l'expansion d'échantillons en Téflon
Tirée de Kirby, (1956, p. 93)

Dans un effort pour améliorer la procédure d'essai HOBT, Bouzid *et al.* (2001) ont tenté de mesurer le coefficient de dilatation thermique de deux types de matériaux PTFE sous plusieurs charges. Le PTFE vierge et le PTFE chargé (1/8 de pouce) ont été testés. Ils ont alors constaté l'existence d'une différence substantielle, pourtant acceptée dans la littérature.

Bien que Touloukian *et al.* (1977) aient publié un ouvrage consacré au coefficient de dilatation thermique des matériaux non métalliques, il reste que très peu de données sont incluses à propos des matériaux à base de PTFE, comme ceux utilisés dans la fabrication des

joints d'étanchéité. Des valeurs de dilatation linéaire thermique ont été présentées sous forme de courbe, comme l'illustre la figure 1.4.

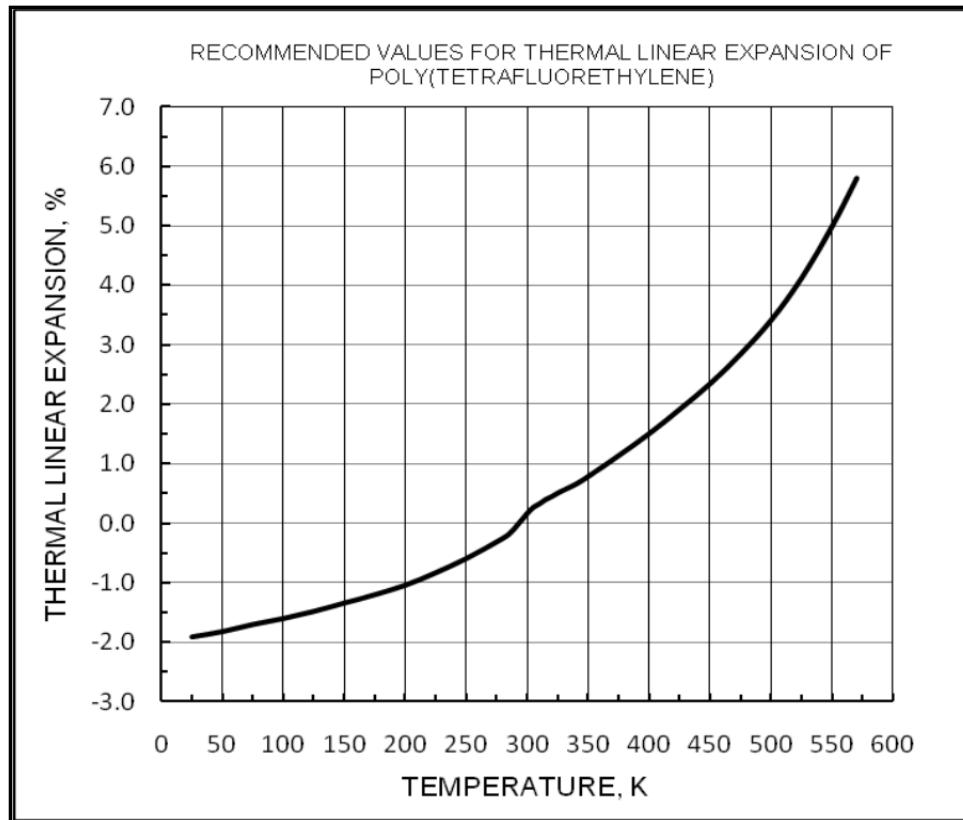


Figure 1.4 Variation de l'expansion thermique linéaire

Tirée de Touloukian (1977, p. 1443)

Même si de nombreuses études existent dans la littérature concernant la mesure du coefficient d'expansion thermique, il n'en demeure pas moins que peu d'études ont été publiées sur le PTFE.

Engeln *et al.* (1984) ont analysé le comportement de dilatation thermique des spécimens en PTFE ayant été étirés uniaxialement à une température bien définie. Les coefficients de

dilatation thermique et les modules de Young, à la fois parallèles et perpendiculaires à la direction de tirage, ont été mesurés dans une plage de température bien déterminée.

Rae *et al.* (2004) ont également étudié le comportement en compression des échantillons en Téflon (PTFE). Les tests ont été effectués pour divers taux de déformation et pour différentes températures. Aussi, plusieurs techniques ont été utilisées afin de mesurer les propriétés physiques et la cristallinité du PTFE.

Dans une étude présentée par Yoshio Okada (1992), un nouveau modèle a été proposé. Ce modèle permet d'estimer les coefficients d'expansion thermique dans le cas des polymères renforcés de fibres. En plus, une comparaison a été réalisée entre les données prédites par le modèle et les essais expérimentaux.

À la lecture des travaux antérieurs, il faut noter l'existence d'autres recherches qui sont aussi en rapport avec notre sujet et notre travail. Ainsi, Tandon *et al.* (1991) ont mené une étude expérimentale en vue d'examiner l'effet de l'addition de fibres dans des polymères sur l'augmentation du coefficient de dilatation thermique. Cette étude a été suivie par une comparaison entre les prédictions théoriques obtenues et les mesures expérimentales des coefficients de dilatation thermique.

Une analyse a été menée par Rodriguez (1986) sur les effets thermiques à fortes pressions hydrostatiques dans des échantillons de PTFE, ainsi que sur la relation entre ces effets et le mouvement de la chaîne moléculaire. Briskman *et al.* (2007) ont effectué une série d'examens sur les propriétés thermiques du PTFE, incluant le coefficient d'expansion thermique. La dégradation des propriétés thermiques et de la structure dans ce matériau a été discutée, et des modèles pour la description de ces effets ont été présentés.

Bouzid *et al.* (2001) ont mentionné, dans leurs études servant à prédire la température de réserve des joints en téflon en opération, que l'épaisseur et la charge ont un effet majeur sur le coefficient d'expansion thermique et qu'une relaxation additionnelle de la charge est

causée par la différence de dilatation thermique entre le joint et les brides provoquant son éclatement.

Ohmura *et al.* (2006) ont réalisé une étude expérimentale incluant l'effet de l'expansion thermique du joint sur la charge dans la boulonnerie, afin de mettre au point une procédure pour la conception des assemblages à brides boulonnées munis de joints d'étanchéité. Les auteurs ont alors constaté que le coefficient d'expansion thermique du joint change sensiblement pour une température inférieure à 150 °C.

1.2.2.2 Facteurs influençant le coefficient d'expansion thermique

Les paramètres qui peuvent influencer l'expansion thermique d'un polymère sont :

La température de transition vitreuse

Parmi les méthodes utilisées afin de déterminer la température de transition vitreuse T_g, citons les deux méthodes présentées à la figure 1.5 :

- La méthode DSC, qui est une procédure d'analyse se basant sur la différence d'enthalpie pour déterminer la variation du flux de chaleur, permet de déterminer la température de changement de phase T_g.
- La méthode TMA constitue une technique qui se fonde sur l'analyse thermomécanique mesurant la dilatation thermique linéaire d'un matériau sous contrainte de compression et de température.

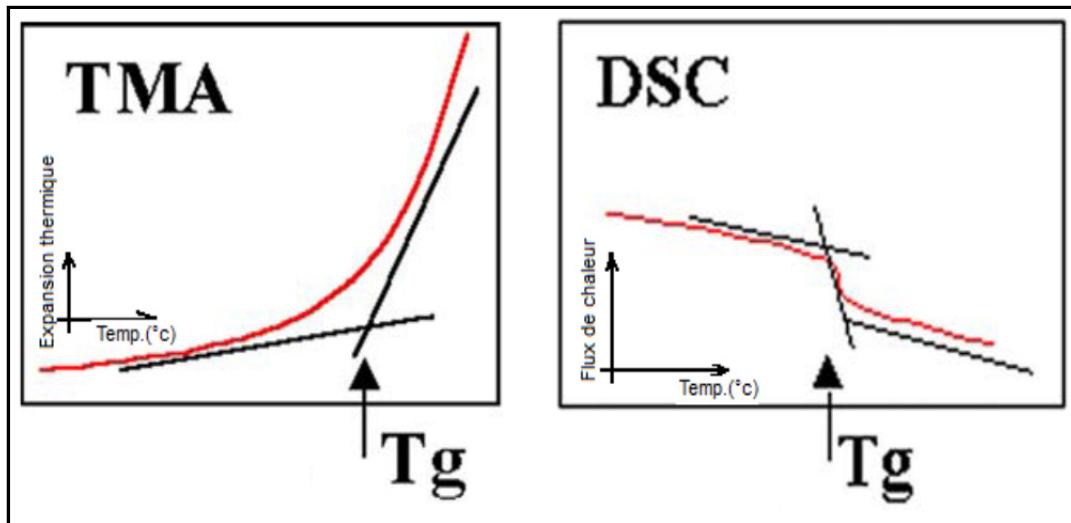


Figure 1.5 Méthodes pour déterminer la température de transition vitreuse
Adaptée d'Arlon Application Notes

Parmi les études qui se sont intéressées à l'influence de la transition vitreuse du matériau (PTFE) sur les propriétés mécaniques, notamment le coefficient d'expansion thermique, nous pouvons citer Bradson (1999), qui a présenté dans le chapitre 4 de son livre que la valeur de la température de transition vitreuse du PTFE s'estime à 115 °C et que les facteurs pouvant influencer la variation de cette valeur sont, entre autres :

- la rigidité de la chaîne de matrice du PTFE;
- les substances d'addition à la matrice du PTFE;
- la porosité;
- la charge appliquée.

Araki (1965) a effectué une étude expérimentale permettant de mesurer la relaxation du PTFE sur une plage de température variant entre 60 °C et 150 °C. Cette étude a démontré que ce polymère possède deux températures de transition, soit environ 80 °C et 100 °C.

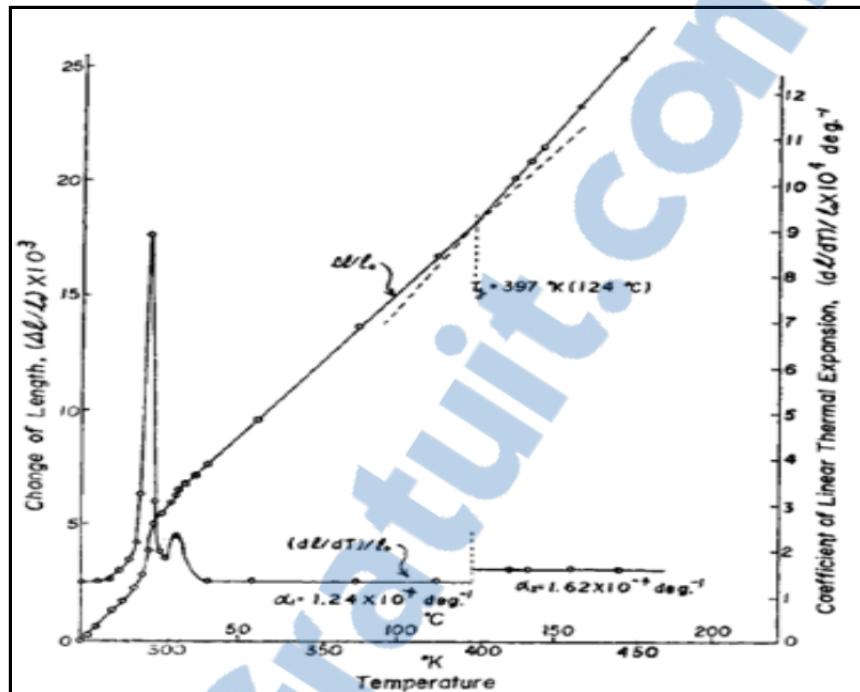


Figure 1.6 L'expansion linéaire du PTFE
Tirée de Araki (1965, p. 424)

Dans une autre étude portant toujours sur le même sujet, Araki (1965) a abordé le lien entre le coefficient d'expansion thermique et la température de transition vitreuse. Les résultats expérimentaux montrent bien que la variation de l'expansion thermique linéaire du PTFE avec la température change de direction au point $T = 396$ °C, ce point représentant une caractéristique typique de la transition vitreuse (voir la figure 1.6). Leur étude expérimentale a permis de déduire que la température de transition vitreuse du PTFE (Polyflon M-11) se situe dans une plage de température variant entre 80 °C et 124 °C. Youxi *et al.* (2008), dans leur étude expérimentale sur divers composites à base de polyétheréthercétone, désigné par le sigle PEEK, ont montré que le coefficient d'expansion et le changement d'épaisseur d'échantillons modifient leur évolution à la température de transition vitreuse, comme l'illustre la figure 1.7.

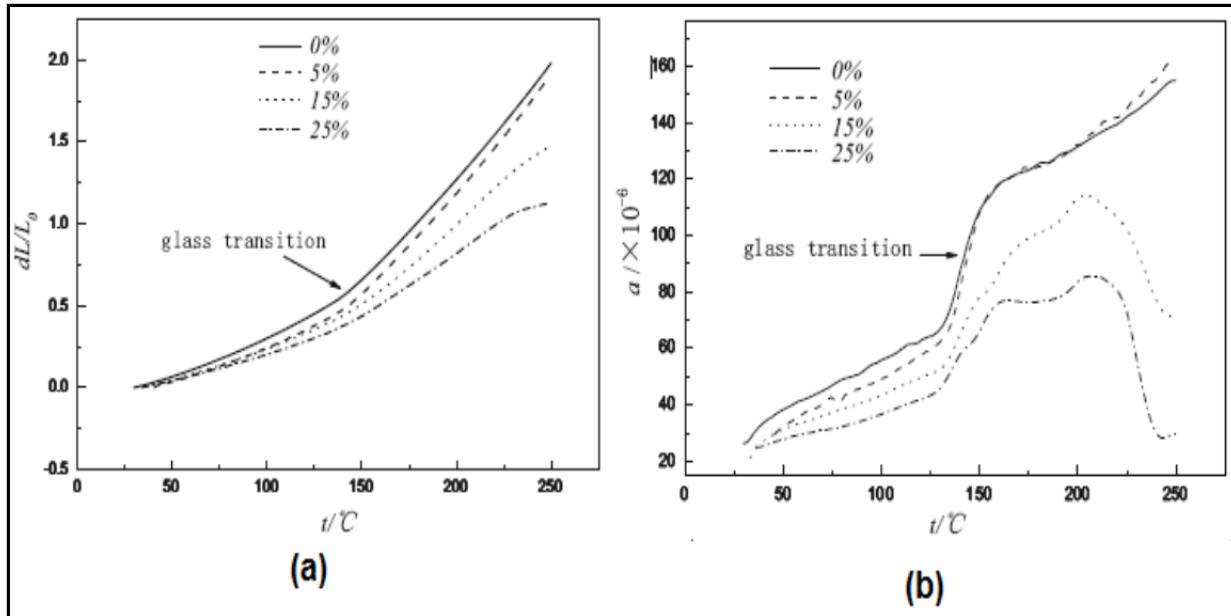


Figure 1.7 Changement de : (a) L’expansion thermique linéaire vs T° et (b) L’épaisseur
Tirée de Youxi (2008, p. 320)

La structure fibreuse

Selon les procédures ASTM et DIN, Huang *et al.* (2000) ont étudié les propriétés mécaniques du PTFE expansé, chargé de fibre, notamment la relaxation au fluage, la compressibilité, la récupération et la rétention de couple, en tenant compte de l’orientation des fibres. Les performances d’étanchéité de ce matériau ont été en outre caractérisées par le test d’étanchéité à température ambiante. Cette étude a révélé que les performances d’étanchéité du PTFE expansé uniaxiallement sont excellentes.

1.2.3 Études du fluage-relaxation

Le fluage constitue un phénomène physique très complexe. Sans doute parce que la réponse d’un matériau sous l’application d’une contrainte constante dans le temps à une température donnée comporte trois domaines différents selon le type de matériau, la contrainte et la température du service. La courbe présentée à la figure 1.8 montre que le fluage se compose de trois stades :

- le fluage primaire, caractérisé par un ralentissement de la déformation et par une augmentation de la résistance du matériau;
- le fluage secondaire, dans lequel la vitesse de déformation demeure constante;
- le fluage tertiaire, caractérisé par une augmentation de la vitesse de déformation et par la diminution de la résistance associée à l'apparition d'un endommagement sensible à l'échelle mécanique.

La courbe 1.8 convient aux métaux et aux polymères, à cette différence près que le fluage dans les polymères se produit à des températures beaucoup plus basses que dans les métaux. Par conséquent, la température apparaît comme un facteur très important dans le fluage des matériaux. Le fluage des métaux et des céramiques dépend de la température de fusion T_f (un métal flue à partir de $0,4 T_f$ et une céramique à partir de $0,5 T_f$) et de la température de transition vitreuse (T_g) dans le cas des polymères (un polymère flue à partir de $1 T_g$).

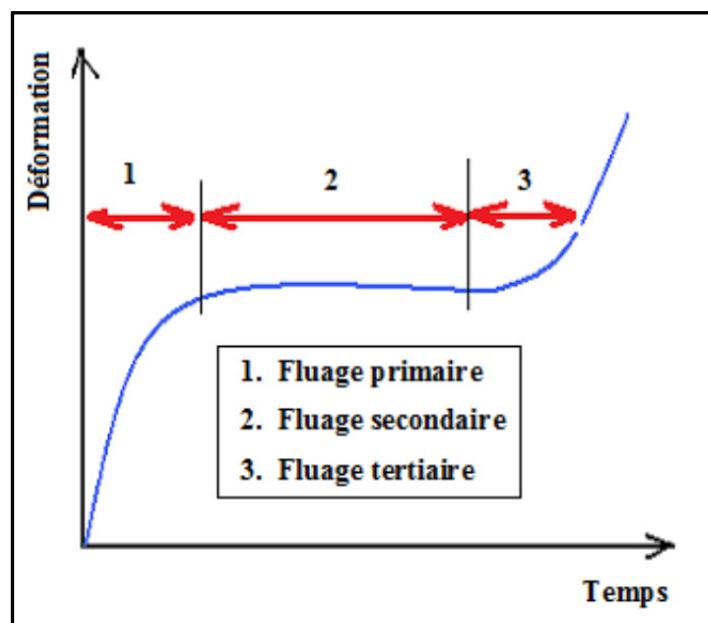


Figure 1.8 Étapes principales du fluage

Tableau 1.2 Caractéristiques thermiques et mécaniques de quelques joints en PTFE
Tiré d'EPRI (2001)

Catégorie du joint en PTFE	Température Maximale (°F)	Compressibilité ASTM 36 (%)	Fluage (%) ASTM F38	Reprise (%) ASTM F38
PTFE vierge	100 Haut taux de fluage (>100°F)	-	-	-
PTFE chargé	350	7-17	11-40	30-40
PTFE molécule	350	60-85	10-15	8-15
PTFE expansé	350	47	35	10

Dans le but de comprendre le phénomène du fluage-relaxation, de nombreux travaux ont été menés. Dans son étude, THORN (1936) a mis en évidence les caractéristiques de quelques joints en service, ainsi qu'une comparaison entre plusieurs types de joints, comme l'expose la figure 1.9.

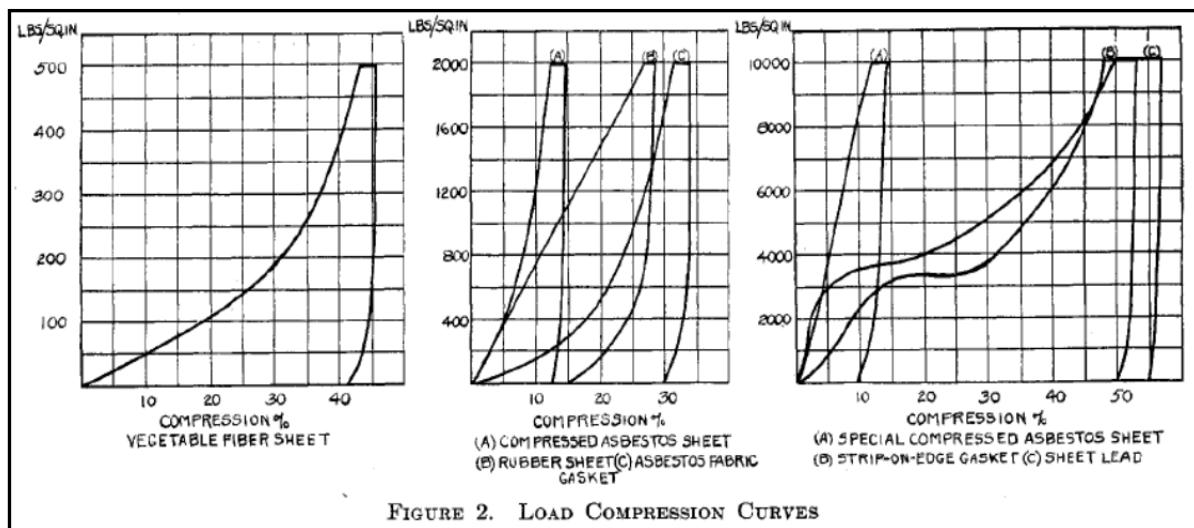


Figure 1.9 Le taux de compressibilité suivant le type de joint
Tirée de Garlock Packing Company, Palmyra, N. Y.

Une description des résultats obtenus sur la relaxation des matériaux en PTFE sous contrainte de compression uniaxiale et en trois dimensions a été effectuée par Zetenev *et al* (1966). Les courbes de relaxation réalisées pour les deux cas ont permis aux auteurs de déterminer la nature de la variation de contrainte à une température donnée et sur un intervalle de temps très long.

L'effet sur le taux de relaxation et sur la déformation a également été examiné. Hammant *et al* (1968) ont présenté, dans leurs études expérimentales, l'effet du temps de chargement sur la déformation de deux types de joints, l'un en PTFE chargé (rigide) et l'autre en PTFE vierge (mou). Les résultats de ces tests ont démontré que le PTFE chargé offre une bonne rigidité à court terme, tandis que le PTFE vierge fournit une meilleure performance à long terme.

Une étude expérimentale entreprise par Viega *et al.* (2007) a permis de dégager les nombreux facteurs contribuant à la perte de charge dans les boulons et à la diminution de la contrainte sur le joint due au phénomène de fluage-relaxation à la température ambiante et aux conditions du service. Une autre étude a été réalisée par Keywood (1992) sur les assemblages à brides boulonnées munis de joints d'étanchéité avec des noyaux fabriqués à partir d'alliage à mémoire de forme. Bickford *et al.* (1998) ont pour leur part présenté les facteurs affectant la relaxation à court terme, tels que la longueur des boulons et les rondelles Belleville.

La déformation due au fluage diffère d'un matériau à l'autre, comme le met en lumière le graphique ci-dessous (Figure 1.10). Cette déformation peut varier en fonction de plusieurs paramètres, comme l'ont démontré diverses études. Le nombre de cycles de chauffage-refroidissement constitue un facteur ayant une influence considérable sur le taux de déformation.

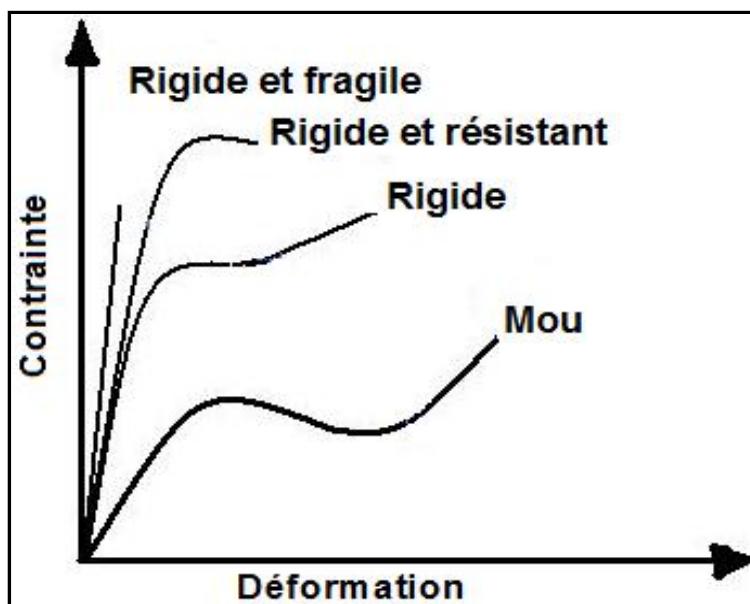


Figure 1.10 Courbe contrainte-déformation en fonction du matériau

Dans ce contexte, Chen *et al* (2005) ont effectué une étude expérimentale en vue de mettre en évidence l'influence du nombre de cycles et de la contrainte de compression sur le taux de déformation cumulée. Les résultats des tests montrent que la déformation accumulée s'accroît avec l'augmentation de la contrainte et du nombre de cycles, comme l'expose la figure 1.11.

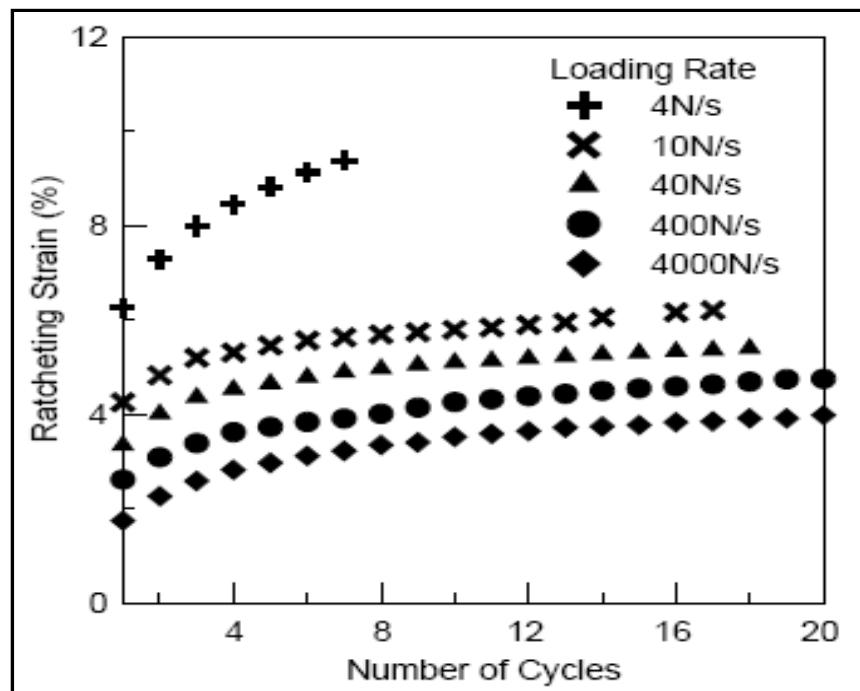


Figure 1.11 L'effet de la contrainte et du nombre de cycles sur l'accumulation de déformation
Tirée de Chen (2005)

1.2.4 Objectifs du projet

Les joints d'étanchéité à feuille à base de polytétrafluoroéthylène (téflon) et d'élastomères sont très utilisés dans les assemblages à brides boulonnées et en particulier dans les installations chimiques, où les explosions dues à la perte de charge excessive de la boulonnerie constituent une préoccupation majeure. Dans ce contexte et dans le cadre de ce travail, deux objectifs principaux ont été fixés.

Le premier est en relation avec la mise au point d'un montage d'essais de mesure du coefficient d'expansion thermique des joints d'étanchéité sous charge, qui sera établi à partir des mesures directes de la variation de l'épaisseur du joint. Le coefficient d'expansion thermique sera déterminé en fonction de :

- la température;
- la contrainte;

- le type de matériau;
- la vitesse de chauffage;
- le nombre de cycles chauffage-refroidissement.

Des essais de fluage à court terme seront effectués à la fin de chaque test de mesure du coefficient de dilatation thermique en maintenant la température et la contrainte sur le joint.

Le deuxième objectif concerne l'amélioration de la procédure d'éclatement des joints à base de téflon (HOBT). Celle-ci comporte :

- une modification du banc d'essai pour l'introduction d'un système de mesure de l'écrasement du joint d'étanchéité durant l'essai;
- une étude de l'effet de Rocher ou du nombre de cycles de chauffage et de refroidissement sur les déformations permanentes cumulées et leur impact sur la réduction de la charge sur le joint;
- une étude de l'effet du fluage à court terme, en maintenant la température sur la contrainte du joint d'étanchéité;
- le test de plusieurs types de joints, afin de couvrir une gamme représentative de joints et ainsi de justifier la généralisation de la procédure modifiée.

CHAPITRE 2

BANCS D'ESSAI EXPÉRIMENTAUX ET PROCÉDURES D'ESSAIS

2.1 Amélioration du banc d'essai HOBT

2.1.1 Généralité

L'utilisation des joints d'étanchéité se retrouve fréquemment dans l'industrie automobile, pétrolière et pétrochimique. Le choix des joints s'effectue en fonction de leur performance dans leurs domaines d'application. On les emploie afin d'assurer l'étanchéité dans un assemblage sous pression, comme les valves, les réservoirs sous pression, les raccordements et les connexions des tuyauteries. La figure ci-dessous présente quelques exemples d'utilisation de joints d'étanchéité dans les assemblages sous pression.



Figure 2.1 Quelques exemples d'utilisation des assemblages sous pression
Tirée de Sealing Technology - Gaskets (2007, p. 4)

2.1.2 Présentation du montage HOBT amélioré

Le banc d'essai illustré à la figure 2.2 a été conçu en vue de mesurer la température de service en fonction de plusieurs paramètres, tels que la géométrie du joint, la pression interne du fluide, la contrainte et le type de matériaux. L'expérimentation vise à mesurer l'écrasement pour différents types de joints d'étanchéité, lorsqu'ils sont soumis à un chargement thermique et mécanique. Les résultats de ces tests permettent l'évaluation des paramètres d'étanchéité, tels que l'expansion thermique, le fluage et la relaxation due à la variation de la température. Ces paramètres jouent un rôle important lors de la conception d'équipement nécessitant l'usage de joints.



Figure 2.2 Vue du montage HOBT

Sur le plan pratique, il est nécessaire d'établir une procédure fiable afin de prédire une marge de sécurité adéquate permettant la prévention des fuites dans un assemblage pressurisé en service, muni d'un joint d'étanchéité. Dans le cadre de nos travaux de recherche, le montage HOBT servira à déterminer les paramètres d'opération produisant l'éclatement du joint. Les paramètres mesurés ou évalués au cours du test sont les suivants :

- la température du joint;
- la pression interne du gaz;
- la contrainte sur le joint;

- l'écrasement du joint;
- la charge dans les boulons;
- le temps.

L'évaluation de ces paramètres est nécessaire pour démontrer la performance du joint et ainsi être en mesure de mieux anticiper par la suite sa résistance à l'éclatement, en vue de choisir convenablement le joint d'étanchéité correspondant à l'application.

2.1.3 L'amélioration apportée sur le banc d'essai HOBT

Le projet d'amélioration du banc d'essai HOBT s'inscrit dans le cadre des recherches effectuées au sein du laboratoire d'étanchéité par le Prof. H. Bouzid, et visant à développer des procédures d'essais des joints en voie d'être adoptés par l'organisme de normalisation ASTM. L'objectif est de mesurer ou de calculer d'autres paramètres caractérisant les joints en PTFE. Cette amélioration inclut l'introduction d'un système de mesure de déplacement à l'aide de capteurs inductifs à transformateur différentiel LVDT (Linear Voltage Differential Transformer); ce qui permet une mesure directe et instantanée de l'écrasement du joint. De cette manière, le fluage et la rigidité du joint et de la bride peuvent être évalués. La figure 2.3 montre le montage des deux LVDT :



Figure 2.3 Montage des LVDT

2.1.4 Description du montage HOBT

Le banc d'essai HOBT présenté à la figure 2.2 constitue un équipement destiné à la caractérisation de la relaxation et de la résistance à l'éclatement des joints à base de teflon. Le banc d'essai se compose des éléments suivants : le réservoir sous pression (qui comprend les brides, les boulons et le joint), les systèmes de chauffage et de pressurisation, les instruments de mesure et de contrôle et le système d'acquisition des données. Les détails sont décrits dans ce qui suit.

2.1.4.1 L'assemblage brides-joints-boulons

L'assemblage à brides boulonnées présenté à la figure 2.4 comprend deux parties distinctes. Une partie inférieure, composée d'un socle et d'une bride du type à emmancher et à souder à face surélevée normalisée ANSI B16,5, de diamètre 0,076 m et de classe 667 N, qui est soudée à un noyau solide métallique. À l'intérieur de ce dernier, une cartouche chauffante générant jusqu'à 2 000 W de puissance est insérée. La partie supérieure inclut un tube de diamètre 0,08 m, soudé à une bride amovible du même type que la bride inférieure. L'ensemble des composantes du montage est constitué d'acier forgé SA 105.

Deux trous sont percés sur les brides inférieure et supérieure, dans le but de faciliter l'insertion des thermocouples permettant le contrôle de la température du montage des brides, et par la suite la détermination de la température du joint. Le jeu radial entre le bloc inférieur (le noyau central) et supérieur forme quant à lui la chambre de pressurisation. Il est à noter que le volume interne du réservoir composé par les deux brides est réduit afin de minimiser la libération d'une grande énergie du gaz comprimé lors de l'éclatement du joint. L'utilisation d'une enceinte thermique amovible a pour fonction d'isoler thermiquement le montage afin de réduire la perte de chaleur.

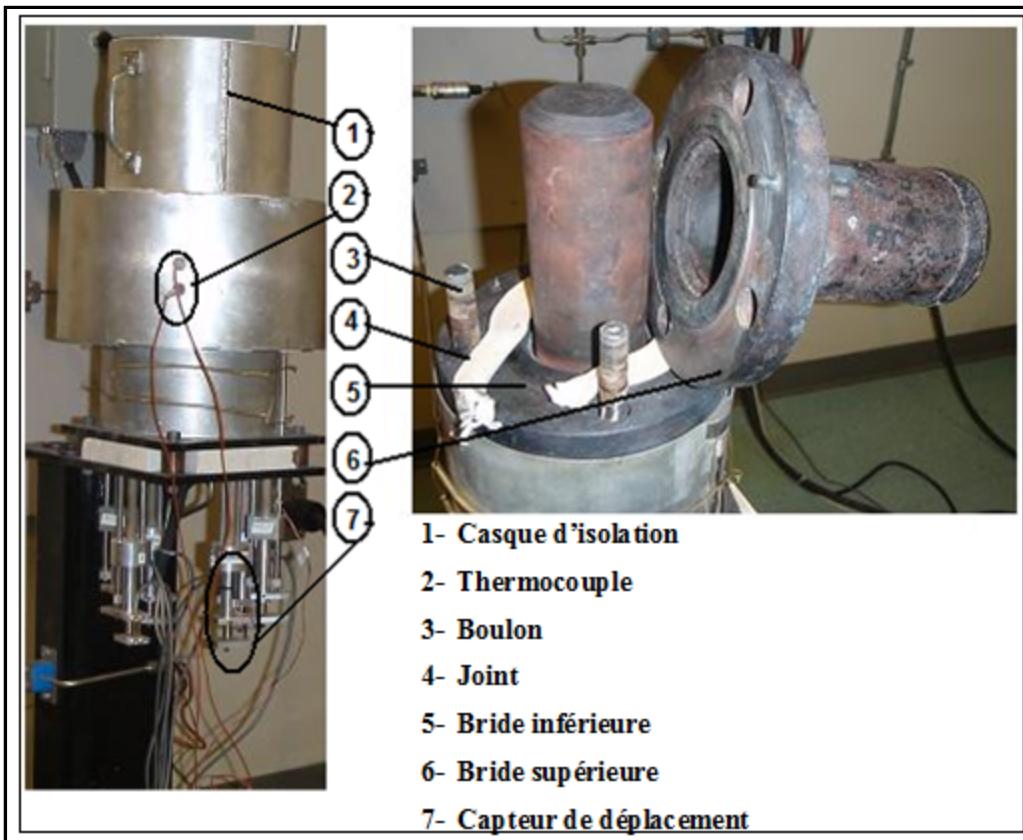


Figure 2.4 Les éléments constituant l'assemblage boulonné HOBT

Quatre boulons du type UNC 5/8-18 (in) ASTM A193 grade B16 sont spécialement usinés pour être fixés sur la bride inférieure, permettant le serrage du joint situé entre les brides inférieure et supérieure du montage (voir l'élément 3 sur la figure 2.4). Chaque boulon est percé au centre de façon à insérer et souder à un bout une tige du même matériau que le boulon, dans le but de mesurer l'allongement et d'en déduire la charge. La figure 2.5 représente l'ensemble boulon-tige, relié à un extensomètre à l'aide d'une tige en céramique insérée dans un tube du même matériau. La tension exercée sur le boulon au cours du serrage entraîne un allongement relatif entre le boulon et la tige, qui est mesuré par l'extensomètre; ce qui rend possible la déduction de la mesure de la tension sur les boulons.

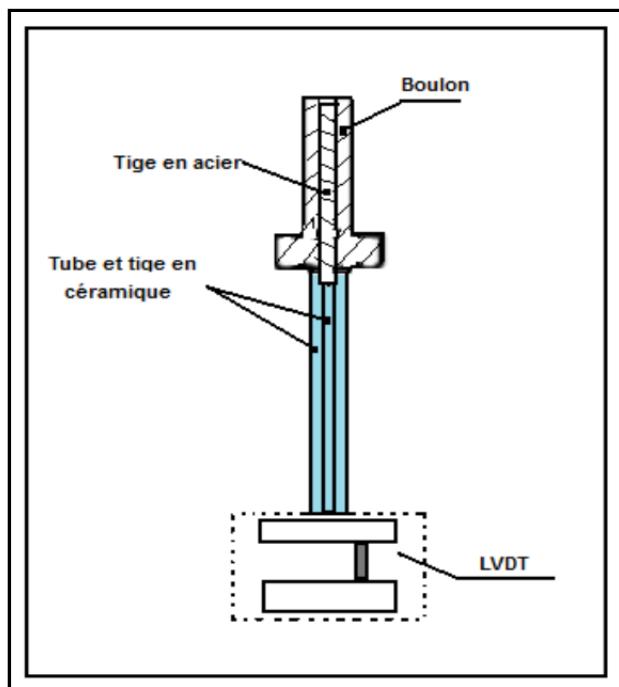


Figure 2.5 Système de mesure de la tension sur les boulons

2.1.4.2 Système de pressurisation

Le système de pressurisation se compose de différents éléments : une bouteille haute-pression de gaz d'hélium, un régulateur de pression, un manomètre, un vase d'expansion pour éviter les fluctuations de la pression lors du chauffage/refroidissement, ainsi qu'un capteur de pression servant à enregistrer la pression ajustée durant la pressurisation. Le système de pressurisation contient plusieurs valves, dont certaines pilotées automatiquement, incluant un système de « by-pass » pour gérer les différentes situations (pressurisation, éclatement, grosse fuite, etc.). La figure 2.6 illustre les principales composantes du système de pressurisation du montage HOBT.



Figure 2.6 Système de pressurisation

2.1.4.3 Système de chauffage

Le système de chauffage est constitué des éléments énumérés à la figure 2.7 :

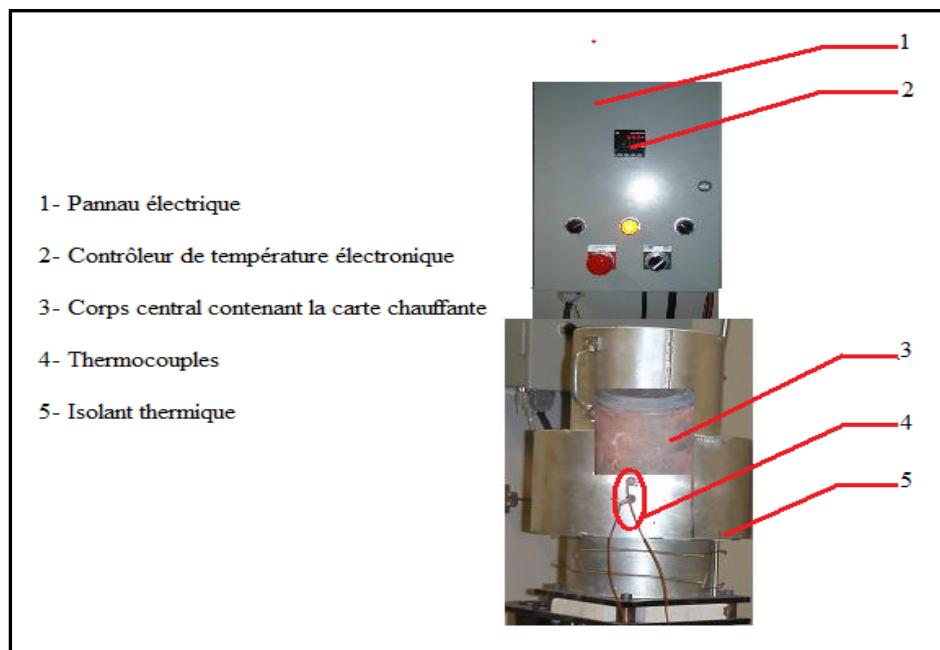


Figure 2.7 Les éléments composant le système de chauffage

2.1.4.4 Système d'acquisition de données

Le système d'acquisition de données a été choisi de manière à répondre aux besoins de ce projet. De fait, une communication entre le système d'acquisition et de contrôle Agilent 34970a et l'ordinateur, par l'intermédiaire d'une interface Labview et d'une carte HPIB, a permis l'enregistrement des données des différents capteurs.

2.1.5 Caractéristiques techniques du montage

Le tableau présenté ci-dessous résume les paramètres pris en considération lors de la réalisation du montage HOBT, ainsi que les caractéristiques techniques des divers éléments utilisés.

Tableau 2.1 Paramètres et caractéristiques du montage HOBT

Paramètres	Caractéristiques
Type de joint	À base de teflon
Dimensions du joint	Diamètre intérieur 0,089 m Diamètre extérieur 0,127 m Épaisseur variable selon le type de joint testé
Type de bride	ANSI B16,5 à emmarcher et à souder NPS 3 class 667 N
Mesure de la charge sur le boulon	Extensomètre à jauge de contrainte
Type de boulon	4 boulons UNC 5/8-18 (in)
Charge maximale	267 KN
Pression interne du gaz max.	7,3 MPa
Température maximale	400 °C
Type de gaz de pressurisation	Hélium, Azote
Capacité de chauffage	Cartouche chauffante 2 000 W
Vitesse de chauffage	1 °C/min

2.1.6 Fonctionnement du banc d'essai

Le banc d'essai HOBT constitue un montage simple à utiliser pour la qualification des joints à base de teflon. Il a pour fonction de caractériser leur comportement au fluage-relaxation et leur capacité à résister à l'éclatement. Il permet ainsi de déterminer la température maximale de fonctionnement ou la température de réserve. Pour la première étape du test, une contrainte de compression initiale d'environ 34 MPa est appliquée sur le joint déjà introduit entre les deux brides rigides (voir les éléments 4, 5 et 6 sur la figure 2.4). La charge est appliquée sur les quatre boulons, par serrage, en utilisant une clé dynamométrique (le boulon représente l'élément 3 sur la figure 2.4). Pendant le test, il est possible de surveiller la contrainte sur le joint en mesurant l'étirement du boulon à travers l'extensomètre. En convertissant l'étirement en tension sur le boulon, la charge sur le joint peut être déduite.

Après le serrage, le montage est pressurisé avec de l'hélium ou de l'azote. La pression est ajustée à partir d'un régulateur de pression connecté directement à la bouteille haute-pression du gaz (figure 2.7). Une fois que la pression est stable, une attente de 30 minutes est requise avant le début du chauffage. Pendant ce temps, le joint relaxe à température ambiante. La température du montage est ensuite augmentée selon un taux constant de 3 °F/min. Le chauffage est assuré à l'aide d'une cartouche chauffante reliée au contrôleur de température. Pendant le chauffage, la température du joint est évaluée à partir des mesures prises par les deux thermocouples situés sur les brides. Afin de réduire la perte de chaleur et d'assurer l'uniformité de la température sur le joint, le montage a aussi été équipé d'un couvercle d'isolation thermique.

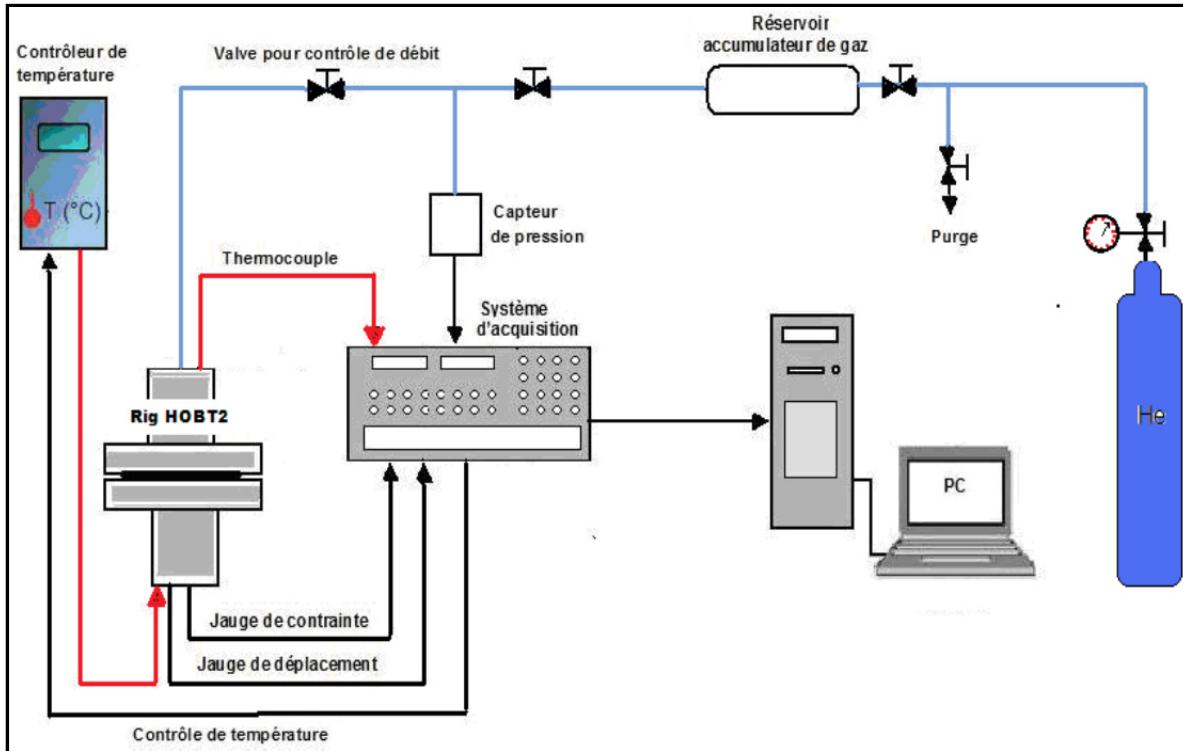


Figure 2.8 Schéma synoptique du banc HOBT

Durant le test, les mesures de la charge dans les boulons, de la pression du gaz, de la température, de l'écrasement du joint, de la contrainte sur le joint et du temps étaient données à l'écran à toutes les 10 secondes et enregistrées sur un fichier à des intervalles de temps réguliers (après chaque minute). L'enregistrement de ces données s'effectuait par un système d'acquisition et de contrôle Agilent 34970a, une carte HPIB et une interface HOBTView programmée sur Labview.

2.2 Mesure du coefficient d'expansion thermique

2.2.1 Introduction

Sous l'effet de la température, le joint subit une variation de son épaisseur. Cette dernière est produite par le fluage et la dilatation thermique linéaire du joint, qui ont un impact considérable sur la charge dans la boulonnerie et par conséquent sur la charge du joint. Ces

variations de charges sont observées en particulier lors des démarrages et des arrêts, et aussi durant les périodes de fluctuations qui sont des régimes transitoires. Jusqu'à présent, peu d'études ont abordé l'effet de la différence de dilatation thermique des différents éléments de l'assemblage sur la redistribution des charges dans les assemblages boulonnés. Ceci est principalement dû au manque de données sur les coefficients d'expansion thermique des joints d'étanchéité sous contraintes élevées. Il est proposé de développer un banc d'essai et d'établir une procédure d'essai afin de mesurer le coefficient de dilatation thermique dans la direction de l'épaisseur du joint, sous l'effet combiné de la température et de la contrainte appliquée. Des joints commerciaux à base de téflon seront testés à des contraintes variant entre 14 et 42 MPa. Une attention particulière sera portée à l'effet de la pression de contact sur le joint et sur le coefficient de dilatation thermique. Des données de fluage seront aussi recueillies à la fin de chaque test lors de l'exécution de la procédure.

2.2.2 Description du banc d'essai TECT

La figure 2.9 présente une vue de l'assemblage du banc d'essai TECT (Thermal Expansion Coefficient Test), développé dans le cadre de cette étude. Il se compose de deux plaques rigides avec des surfaces élevées, et est équipé de deux extensomètres conçus pour mesurer l'écrasement du joint avec précision afin de déduire le coefficient d'expansion thermique et le taux de fluage des joints testés. Le montage TECT est un module qui peut être monté sur le banc d'essai universel de joint UGR (Universal Gasket Rig). L'UGR est aussi équipé de plateaux modulaires pour tester, avec des gaz et des liquides, des joints de diamètre 50.8 à 10.6 mm ayant une épaisseur de 9,5 mm. La capacité maximale de la charge est d'environ 178 KN. L'UGR est conçu pour une pression interne de 2,5 MPa et une température d'environ 343 °C.

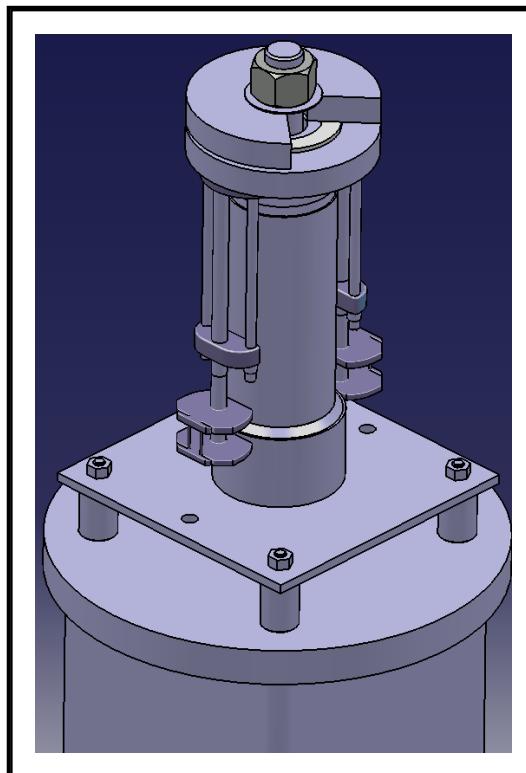


Figure 2.9 Vue du montage TECT

Il est possible d'effectuer les tests de fluage et la mesure du coefficient de dilatation thermique sur la même base. Toutefois, le dispositif de test mécanique, avec ses deux extensomètres représentés sur la figure 2.10 (b et c), doit être monté. Ce montage peut accueillir un joint d'étanchéité de 1,8 pouce de diamètre intérieur, 3 pouces de diamètre extérieur et d'une épaisseur maximale de 0,125 pouce. Il a été développé en vue de mesurer le taux de fluage à court terme et le coefficient de dilatation thermique des joints de matériaux en feuille sous forte charge.

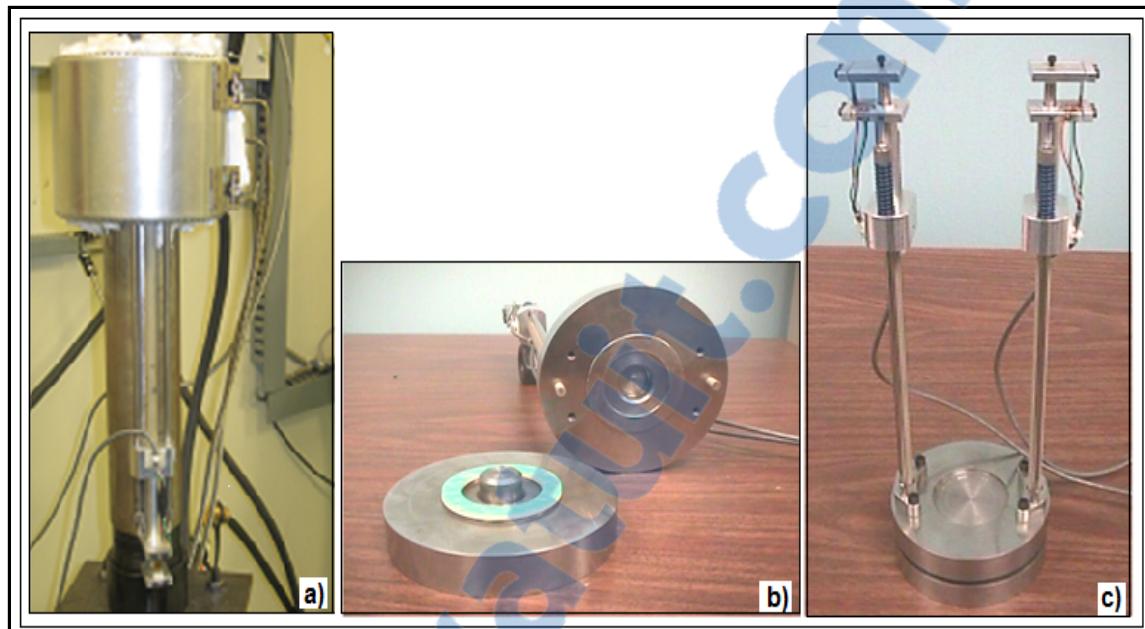


Figure 2.10 Montage TECT avec casque d'isolation : a) Les brides b) Les extensomètres

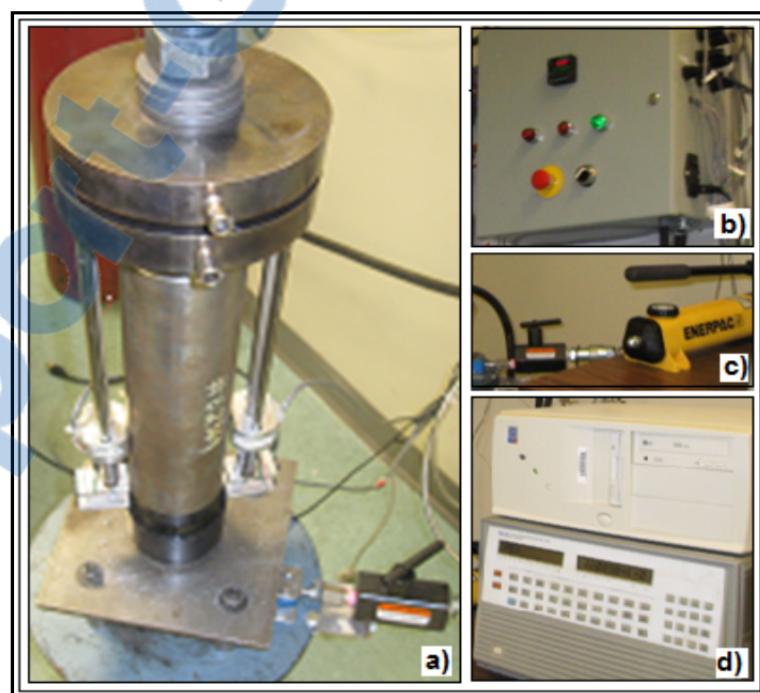


Figure 2.11 Principales composantes du montage TECT

Le banc d'essai TECT est un montage simple dont la rigidité peut être modifiée en rajoutant des rondelles Belleville. La figure 2.11 représente les principales composantes du banc d'essai TECT :

- deux plateaux rigides (figure 2.11 a);
- deux extensomètres de mesure d'écrasement (LVDT);
- un boulon central avec jauge de déformation;
- contrôleur de température (figure 2.11 b);
- thermocouples;
- tendeur hydraulique (figure 2.11 c);
- système d'acquisition et de contrôle (figure 2.11 d);

2.2.3 Caractéristiques du montage TECT

Voici quelques caractéristiques principales du montage TECT :

- la température maximale des tests est de : 343 °C;
- le type des brides (TECT) : plateaux rigides à faces surélevées;
- dimensions du joint : 45,72 x 76,2 mm ou NPS 1,5;
- la contrainte maximale sur le joint : 67 MPa ou une charge du boulon de 178 KN;
- taux de chauffage : 1 à 6 °C/min.

2.2.4 Contexte général

Durant le service, les assemblages à brides boulonnées munis de joints d'étanchéité sont soumis à des fluctuations de température se traduisant par une perte de charge dans les boulons. Ceci est dû principalement à la différence de dilatation thermique entre la bride, les boulons et le joint. Au cours du refroidissement, la dilatation thermique linéaire des joints en téflon a une incidence majeure sur la réduction de la charge du boulon, en raison de la contraction relative. En effet, le coefficient d'expansion thermique du téflon est beaucoup

plus grand que celui de l'acier des boulons et des brides. Il existe très peu de données disponibles dans la littérature sur le coefficient de dilatation thermique des joints soumis à de fortes charges. La procédure d'essai HOBT nécessite la connaissance du coefficient de dilatation thermique du joint en fonction de la température, dans le but de déterminer la température maximale d'opération sécuritaire des joints d'étanchéité à base deteflon. Aussi, il est à noter que les études théoriques et numériques des assemblages boulonnés soumis à de hautes températures deviennent difficiles lorsque les analyses sont effectuées sur des joints autres que les joints métalliques, pour lesquels les données existantes concernant la dilatation thermique sont uniquement disponibles sous vide. Plusieurs normes ASTM décrivent les méthodes d'essai pour évaluer le coefficient de dilatation linéaire, mais aucune de ces normes ne concerne les matériaux sous contraintes élevées.

C'est pourquoi nos travaux de recherche visent à mettre au point une méthode d'essai permettant de mesurer le coefficient de dilatation linéaire et de le fournir pour certains types de joints en téflon soumis à des contraintes variant entre 14 et 41 MPa. Les paramètres suivants, susceptibles d'influencer la dilatation thermique des joints, seront traités dans notre étude :

- le niveau de la contrainte appliquée sur le joint;
- le matériau du joint et son épaisseur;
- la vitesse du chauffage;
- le nombre de cycles de chauffage et de refroidissement;
- la température de chauffage.

Ce type de données acquiert une grande importance pour les concepteurs et les utilisateurs de ce domaine d'étude.

Le coefficient de dilatation thermique d'un joint peut modifier de manière appréciable la charge dans la boulonnerie. En général, un joint tend à s'assouplir lorsqu'il se trouve dans des conditions de haute température et dans de nombreux cas, la contrainte appliquée sur le

joint produit un assouplissement supplémentaire du joint qui entraîne un impact direct sur son éclatement. Dans le projet PVRC 96-06, les chercheurs ont conclu qu'en utilisant des joints à base de teflon, la relaxation induite par la différence de dilatation thermique durant le refroidissement est la cause principale des éclatements de joints observés dans plusieurs assemblages à brides boulonnées rapportés dans la littérature.

2.2.5 Fonctionnement du montage TECT

La figure 2.12 présente le schéma synoptique du montage d'essai utilisé pour mesurer le coefficient d'expansion thermique. Le joint est comprimé entre les deux plateaux rigides au moyen d'un boulon central et d'un tendeur hydraulique actionné par une pompe manuelle. La charge appliquée sur le joint est mesurée au moyen d'un système de pont de jauge de déformation, collé sur la surface extérieure du boulon.

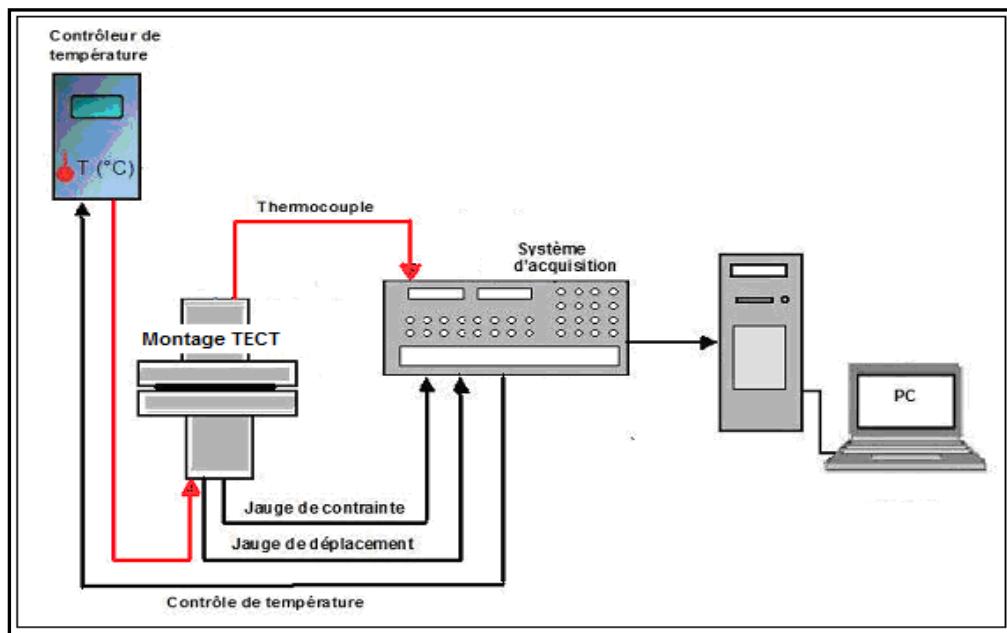


Figure 2.12 Schéma synoptique du banc d'essai TECT

L'appareil a été conçu pour supporter une contrainte maximale de 70 MPa sur le joint. Les rondelles Belleville pouvaient être installées afin de maintenir partiellement la charge après

la fermeture de la valve hydraulique, tel que montré à la figure 2.11 (c). La rigidité de l'ensemble peut être contrôlée par le biais de l'introduction d'un nombre adéquat de rondelles.

L'écrasement du joint est mesuré à deux endroits diamétralement opposés, en utilisant les extensomètres qui servent à capter le mouvement relatif des deux plateaux. La température est contrôlée au moyen d'un thermocouple et d'un contrôleur de température PID. Deux thermocouples, situés à l'intérieur des brides placées de façon diamétralement opposée au voisinage du joint, permettent la mesure de la température de ce dernier.

Les brides sont chauffées à partir de l'extérieur, avec une bande chauffante en céramique. Un régulateur PID est utilisé pour contrôler la température du joint. Le régulateur PID ajuste la température en fonction de la lecture d'un thermocouple situé près de la bande chauffante et proche du diamètre extérieur des plateaux, tout en étant relié à l'ordinateur via un port série RS232. La figure 2.11 (b) montre le panneau de contrôle électrique qui est relié au système de chauffage de l'assemblage. Le chauffage a été effectué avec une rampe contrôlée par le régulateur PID. Le refroidissement s'effectuait par la convection naturelle après l'arrêt du chauffage. Il était très important d'effectuer une compensation de la lecture des jauge du boulon produite par la température. Par exemple, à 343 °C, la déviation provoque une diminution équivalente à environ 1,4 MPa de la contrainte du joint. Les données étaient enregistrées par l'entremise du système d'acquisition HP3258, d'une carte GPIB et d'une interface de pilotage LabView.

2.3 Essais expérimentaux

2.3.1 Introduction

Le but de ce chapitre consiste à présenter les deux procédures permettant de déterminer les performances des joints choisis dans le cadre de cette recherche. Les joints testés ont été classés en trois catégories en fonction de leur degré de rigidité : mou, rigide ou encore

métaloplastique. L'étude expérimentale s'est déroulée sur deux bancs d'essai différents au sein du laboratoire d'étanchéité, soit le banc d'essai HOBT (Hot Bow-Out Test), déjà décrit au second chapitre de notre rapport, et le montage TECT (Thermal Expansion Coefficient Test), présenté au chapitre précédent. Après une description des types des joints testés sur les deux bancs d'essai HOBT et TECT, nous ferons une présentation des conditions dans lesquelles se sont déroulés les tests. Par la suite, nous exposerons la procédure expérimentale propre à chaque banc d'essai. Les paramètres mesurés en fonction des procédés TECT et HOBT nous permettront ensuite de déterminer le coefficient d'expansion thermique et le taux de fluage, de même que de faire des analyses sur les effets de Rocher et sur le temps à court terme, et finalement de réaliser une étude comparative.

2.3.2 Essais sur le montage HOBT

Dans cette partie du travail, nous nous attardons principalement à étudier l'effet de la contrainte initiale et du nombre de cycles de chauffage-refroidissement sur la température d'éclatement des joints d'étanchéité à base deteflon. Ceci consiste en la mise au point de la procédure d'analyse expérimentale HOBT, afin de déterminer la température maximale et la contrainte minimale pendant le service.

L'établissement de la limite de température de service d'un joint nécessite une bonne connaissance de sa capacité à résister à la dégradation due à l'exposition à la chaleur et au fluage à court et long terme. Les travaux antérieurs nous permettent d'avancer que l'introduction d'un certain nombre de cycles de chauffage et de refroidissement dans la procédure actuelle d'essai d'éclatement de joint HOBT (Hot Blow-out Test), permet de prendre en compte les déformations plastiques cumulées et de voir l'impact de la réduction de la charge sur le joint lors du refroidissement.

2.3.2.1 Les différents joints testés

Six familles de joints à base de teflonont été mises à l'épreuve. Des détails concernant le groupe de familles des joints testés sont représentés au tableau 2.2. En ce qui a trait à la géométrie, l'épaisseur des joints utilisés dans l'étude varie entre 1,5875 mm à 3,175 mm, ils peuvent être mous ou rigides, et les diamètres intérieurs et extérieurs sont de 89 mm et 128 mm respectivement.

Tableau 2.2 Groupe de familles de joints testés par la procédure HOBT

Type de test	Famille des joints		Catégorie	Épaisseur (mm)
HOBT	F		métaloplastique	3,2
	A	A3		
		A1		
		A2		6,35 et 3,2 et 1,6
	B			
	E		mou	3,2
	C	C1		
		C2		
		C3		
	D		rigide	

2.3.2.2 Programmes des tests

Les six familles de joints à base de teflon ont été testées en utilisant le montage HOBT, selon le programme d'essais indiqué au tableau 2.3.

Tableau 2.3 Ensemble des tests réalisés sur le banc d'essai HOBT

Type de test	Type	Familles de joints	Condition du test	$P_{(Int.)}$ (MPa)	S_g (MPa)	Temp. (°C)	
HOBT_Std	teflon Vierge	A1	Effet de la contrainte initiale	3	20	370	
HOBT avec 3 cycles			Effet de la pression		34		
HOBT_Std					48		
HOBT avec 20 cycles			7	0	250		
HOBT avec 3 cycles				3	250		
				7	160		
			Effet du maintien de la température			175/230	
			Effet du nombre de cycles			260	
			Effet de l'épaisseur	34		260	
HOBT_std	Métallo-plastique	F	Effet du type de joint	3		370	
	A3						
	Teflon Chargé	C2					
	C3						
	D						
	A1						
	C1						
	B						
	E						

2.3.2.3 Procédure expérimentale

Afin de réaliser les tests sur le banc d'essai HOBT, la procédure de mesure suivante a été suivie :

- mesurer l'épaisseur initiale sans charge du joint à tester;

- nettoyer la surface des brides et des boulons afin d'enlever toute matière résiduelle;
- introduire le joint entre les deux brides et graisser les boulons;
- serrer les boulons à la main afin d'assurer le contact entre les brides et les joints et mettre les capteurs de déplacement (extensomètres) à zéro avec le programme Labview;
- appliquer manuellement sur le joint la contrainte requise à l'aide d'une clé dynamométrique en quatre passes, afin d'atteindre la contrainte prévue sur le joint;
- laisser le joint fluer et relaxer pendant 5 minutes;
- resserrer les boulons pour revenir à la valeur initiale de la charge sur le joint (34MPa);
- laisser le joint fluer et relaxer pendant 30 minutes;
- pressuriser l'assemblage à la pression requise avec le gaz d'hélium;
- chauffer le joint à un taux de 3 °C/min;
- au besoin, effectuer les cycles chauffages et de refroidissement;
- une fois le joint éclaté ou la température maximale du banc d'essai atteinte, arrêter le chauffage et laisser refroidir l'assemblage.

2.3.3 Les essais réalisés sur le montage TECT

L'objectif de la présente partie consiste à générer des données sur le coefficient d'expansion thermique et le fluage à court terme, afin de prédire l'évolution des conditions d'opération avec la température, la contrainte initiale et le temps. Ces paramètres représentent les facteurs principaux pouvant affecter le phénomène de l'expansion thermique et du fluage-relaxation dans les joints à base de teflon.

Ce qui suit présente un aperçu de la procédure après une mise au point, ainsi que le programme d'essais effectués sur quatre familles de joints en téflon. Le coefficient de dilatation thermique de ces échantillons a été établi pour des températures atteignant jusqu'à 260 °C. Les effets de la charge et du taux de chauffage ont également été étudiés. Dans cette partie de notre étude, nous nous attardons à la mesure du coefficient d'expansion thermique et à la quantification du taux de fluage pour quatre familles de joints à base de téflon. Cette étude a été effectuée pour des séries d'échantillons de deux épaisseurs différentes (1,5875 mm et 3,175 mm). Les tests ont été réalisés pour divers niveaux de contraintes (14, 28 et 42

MPa) et pour une plage de température variant entre 200 °C et 260 °C. Exceptionnellement, une température de 150 °C a été choisie pour accomplir les tests de 42 MPa.

2.3.3.1 Les différents joints testés

Quatre familles de joints ont été utilisées, parmi les six déjà désignées précédemment dans la partie des tests sur le banc d'essai HOBT. Le tableau suivant récapitule l'ensemble.

Tableau 2.4 Groupe des familles de joints testés avec le montage TECT

Type de test	Familles des joints	Type	Épaisseur (mm)	
TECT	A1	mou	1,6	
			3,2	
	B		1,6	
			3,2	
	C	rigide	1,6	
			3,2	
	D		1,6	
			3,2	

2.3.3.2 Description du programme d'essais

Quatre types de joint à base de teflon ont été testés avec le montage TECT assemblé sur la machine UGR. Le programme de test est indiqué dans les tableaux 2.4 et 2.5. La première série de tests visait à étudier l'effet du taux de chauffage et le nombre de cycles de chauffage, comme l'illustre le tableau 2.5. Le tableau 2.6 expose quant à lui la deuxième série de tests, basée en fait sur les résultats de la première série. Ce test peut être exploité en vue de déterminer l'écrasement dû au fluage à court terme lors du premier chauffage, de même que le coefficient de dilatation thermique au cours du refroidissement.

Tableau 2.5 Première série de tests

Type de matériau	Contrainte (MPa)	Nb. de cycles chauffage/refroidissement	Vitesse de chauffage (°C/min)		
			1	3	6
D	14	2	●		
		1	●	●	●
	28	1	●		
	42	1	●		

Tableau 2.6 Deuxième série des tests

		Température (200 °C)		
Type de matériau	Épaisseur du joint (mm)	Niveau de contrainte (MPa)		
		14	28	42
C	3,2	●	●	●
		●	●	●
		●	●	●
B	3,2	●	●	●
		●	●	●
A1	3,2	●	●	●
		●	●	●

2.3.3.3 Procédure expérimentale TECT

La figure 2.13 présente la procédure type des essais TECT, ayant pour objectif de mesurer le fluage et le coefficient de dilatation thermique est la suivante :

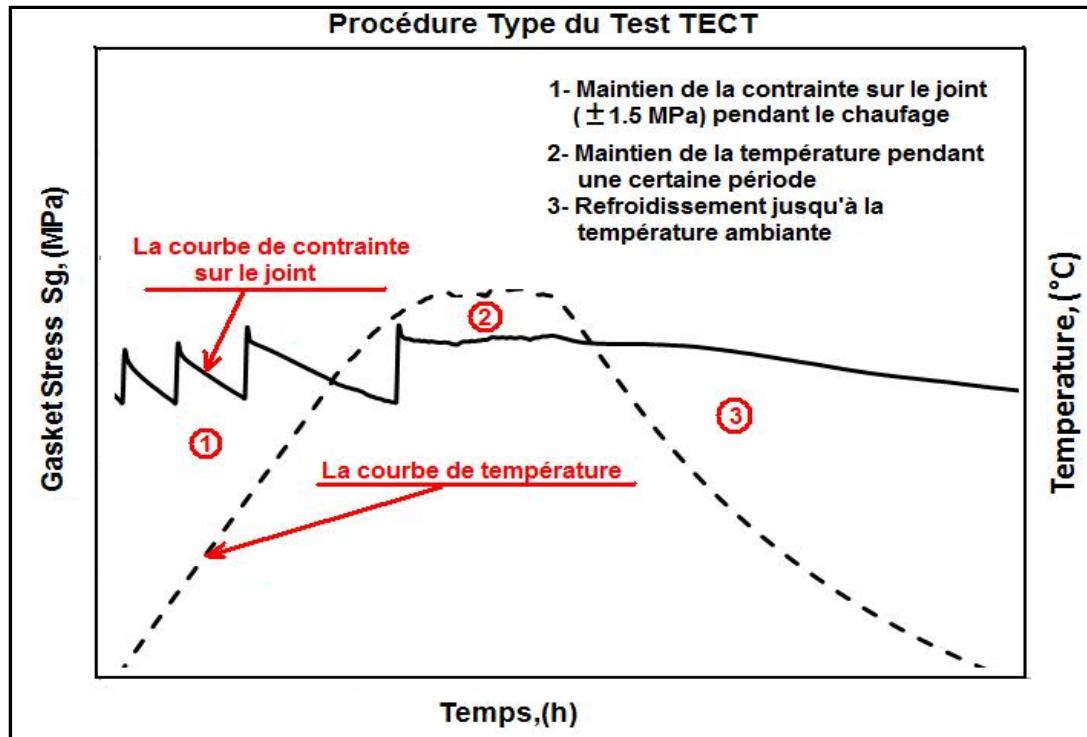


Figure 2.13 Schéma de la procédure type des essais TECT

Les étapes détaillées de la procédure sont comme suit :

- le boulon et les surfaces des plateaux sont d'abord nettoyés pour éliminer tous les résidus. La graisse (à base de molybdène) est ensuite soigneusement appliquée sur les boulons, les rondelles et les écrous;
- l'épaisseur des deux plaques montées sans joint est mesurée à différents points sur la périphérie;
- le joint est ensuite installé entre les deux plateaux;
- après avoir placé le joint entre les brides, les boulons sont serrés à la main. Les capteurs de déplacement doivent être mis à zéro;
- le boulon est ensuite serré à l'aide d'un tendeur hydraulique pour atteindre le niveau de la contrainte du joint nécessaire;
- l'épaisseur totale des deux brides, y compris le joint, est alors mesurée;

- l'ensemble est par la suite chauffé à un taux de (1 °C/min), jusqu'à l'atteinte de la température cible;
- les lectures sont suivies toutes les 10 secondes et enregistrées chaque minute;
- lorsque la température augmente, le fluage se produit et la contrainte du joint est réajustée à la valeur spécifiée à $\pm 10\%$;
- la température est alors maintenue à la valeur spécifiée pendant deux heures lors de l'enregistrement des mesures. Le chauffage est pour sa part arrêté afin de commencer le refroidissement jusqu'à la température ambiante.

2.4 Présentation des différents calculs du paramètre

Les diverses méthodes et techniques utilisées pour le calcul des différents paramètres sont :

2.4.1 Calcul de la perte de charge dans les boulons

La figure 5.1 illustre les facteurs ayant un effet sur la force de serrage. Lors du serrage des boulons, une charge est créée sur les brides, lesquelles exercent une force sur le joint. Selon la figure 2.13, on distingue trois forces qui agissent sur l'assemblage à brides boulonnées en opération :

- la force hydrostatique créée par la pression intérieure du fluide F_p ;
- la réaction du joint F_j ;
- la force dans les boulons F_B .

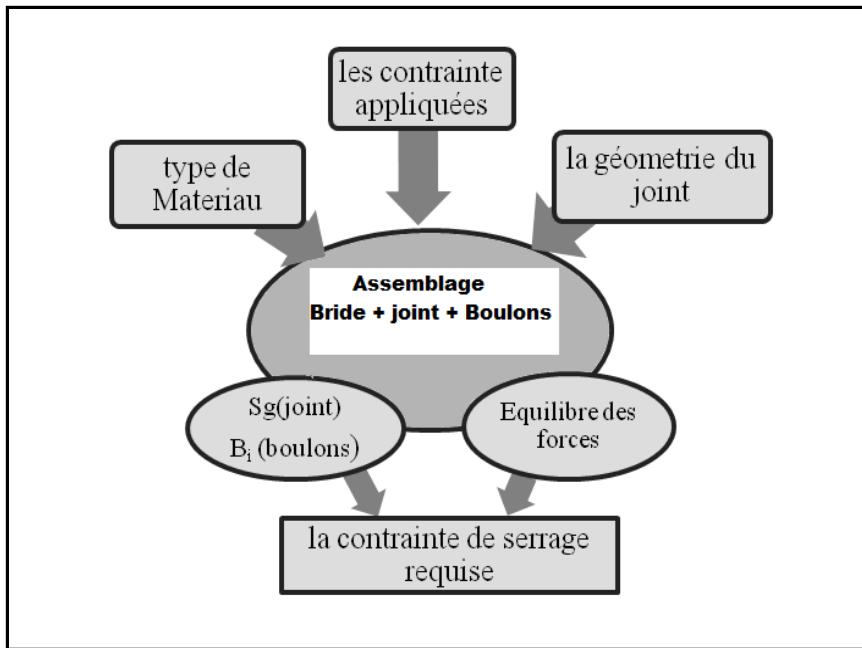


Figure 2.14 Facteurs influençant la force de serrage

À l'équilibre, la somme de ces trois forces est donnée par la relation suivante :

$$F_B = F_P + F_j \quad (2.1)$$

La valeur de la force sur le joint F_j doit être suffisante pour assurer l'étanchéité et elle dépend du type de joint utilisé.

La charge appliquée sur les boulons crée une force sur le joint, lui permettant ainsi de maintenir une certaine étanchéité. Pour ce faire, il est nécessaire de bien adapter la forme des surfaces et de nuire les défauts surfaciques. La contrainte de serrage constitue un des moyens essentiels pour assurer l'étanchéité des assemblages boulonnés.

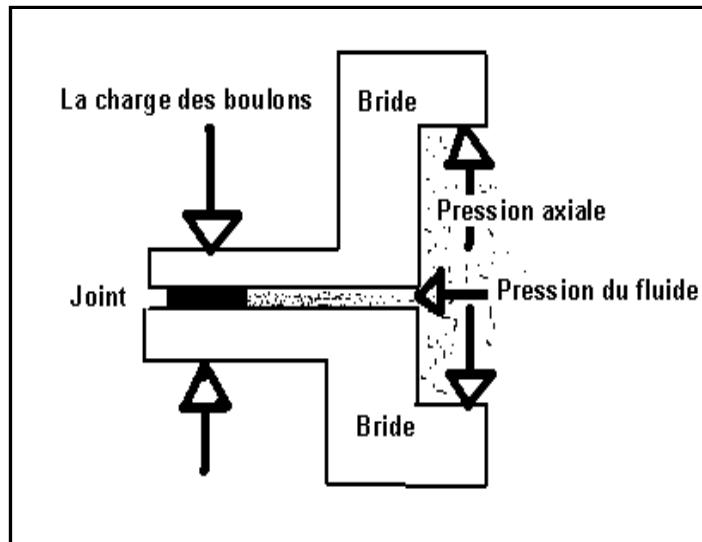


Figure 2.15 Forces agissantes sur le joint

De nombreuses recherches ont été effectuées en vue de fournir des données suffisamment précises pour prédire la contrainte de serrage et ainsi obtenir un assemblage bien étanche. En opération, la charge dans les boulons B_i représente la somme de la force sur le joint et de la force hydrostatique (force de pression) :

$$F_B = S_g * A_g + P * A_p \quad (2.2)$$

La surface du joint soumis aux efforts axiaux est donnée par l'équation suivante :

$$A_g = \frac{\pi}{4} (D_{ext}^2 - D_{int}^2) \quad (2.3)$$

Où D_{ext} et D_{int} représentent les diamètres extérieur et intérieur du joint.

La surface radiale soumise à la pression interne du gaz pressurisé est représentée par la formule ci-dessous :

$$A_P = \frac{\pi}{4} (D_{int}^2) \quad (2.4)$$

2.4.2 Calcul du taux de compression du joint au serrage

La mesure du taux de compression du joint sous charge de serrage préliminaire s'effectue en appliquant une précontrainte de serrage sur la surface du joint comprimé entre les deux brides de l'assemblage et la température ambiante, sans pression interne et à court terme. Ce taux de compression correspond au rapport entre l'épaisseur initiale du joint (avant l'application de la contrainte) et l'épaisseur finale, comme le démontre l'équation suivante :

$$Taux\ de\ compression\ (%) = \left(\frac{E_i}{E_c^{TA}} \right) \quad (2.5)$$

Évidemment, ce test se déroule à la température ambiante et sans pression interne. Il fournit des informations relatives au matériau d'étanchéité et concernant l'effet de la charge appliquée sur le joint.

2.4.3 Calcul du taux de fluage et de relaxation

Après la mesure de l'écrasement du joint, on passe au calcul du taux de fluage du joint à partir de la formule suivante :

$$Taux\ de\ fluage\ (%) = \frac{(E_c^{TA} - E_f^{TS})}{E_c} \times 100 \quad (2.6)$$

Quant à la relaxation du joint, elle se calcule par la formule ci-après :

$$Relaxation (\%) = \left[\frac{(S_g^i - S_g^f)}{S_g^i} \right] \times 100 \quad (2.7)$$

2.4.4 Calcul du coefficient d'expansion thermique

$$\alpha = \left[\left(\frac{(E_i - E_f)}{E_i} \right) \right] / (T_i - T_f) \times 10^6 \quad (2.8)$$

Avec :

E_i , T_i sont l'épaisseur et la température au début de refroidissement;

E_f , T_f sont l'épaisseur et la température à la fin de refroidissement.

Le calcul de l'épaisseur E_i se détermine à partir des mesures expérimentales du déplacement des LVDT (Dj_i et Dj_f au début et à la fin de refroidissement) selon l'équation suivante :

$$E_i = E_f + (Dj_f - Dj_i) \quad (2.9)$$

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET ANALYSE

3.1 Introduction

Ce chapitre met en évidence les résultats obtenus par les deux procédures d'essais décrites au chapitre précédent. Chacune de ces procédures a nécessité un calcul complétant notre étude d'évaluation de la performance des différentes familles de joints testés. Cette partie de notre recherche, divisée en trois sections, décrit les résultats obtenus tout en effectuant une étude comparative. La première section brosse un tableau de l'ensemble des paramètres mesurés et calculés sur le banc d'essai HOBT. Les résultats et les calculs du procédé TECT sont arborés dans la deuxième partie. Enfin, la troisième section de ce chapitre fait état des paramètres mesurés et calculés par les deux procédés.

3.2 Résultats des Tests TECT

Dans cette section, nous nous attardons au comportement des joints rigides et mous testés lors de cette étude. Les essais de mesure du coefficient d'expansion thermique ont été réalisés sur quatre joints appartenant à quatre familles différentes. La comparaison des joints testés a permis de dégager une différence significative sur le taux de fluage et le coefficient d'expansion thermique. Cette observation est probablement révélatrice de l'effet de la structure du matériau.

3.2.1 Effet de la contrainte sur le joint

La contrainte appliquée sur le joint risque d'affecter les valeurs de plusieurs paramètres tels que : le fluage, l'expansion thermique et la température de transition vitreuse. Les figures 3.1 à 3.10 illustrent l'effet du niveau de contrainte sur le comportement du joint appartenant à deux catégories : rigides et mous. Il faut noter que les tests ont été effectués à des contraintes de 14, 28 et 42 MPa.

3.2.1.1 Joint rigide

Plusieurs joints rigides ont été testés à 200 °C pour divers niveaux de contrainte appliquée (14, 28 et 42 MPa). L'épaisseur du joint diminue avec l'augmentation de la contrainte appliquée, comme le montre la figure 3.1. Il semble que cette variation soit liée à la densification du joint. De plus, la présence des cavités dans le matériau minimise sa densification, et par la suite sa résistance à la compressibilité

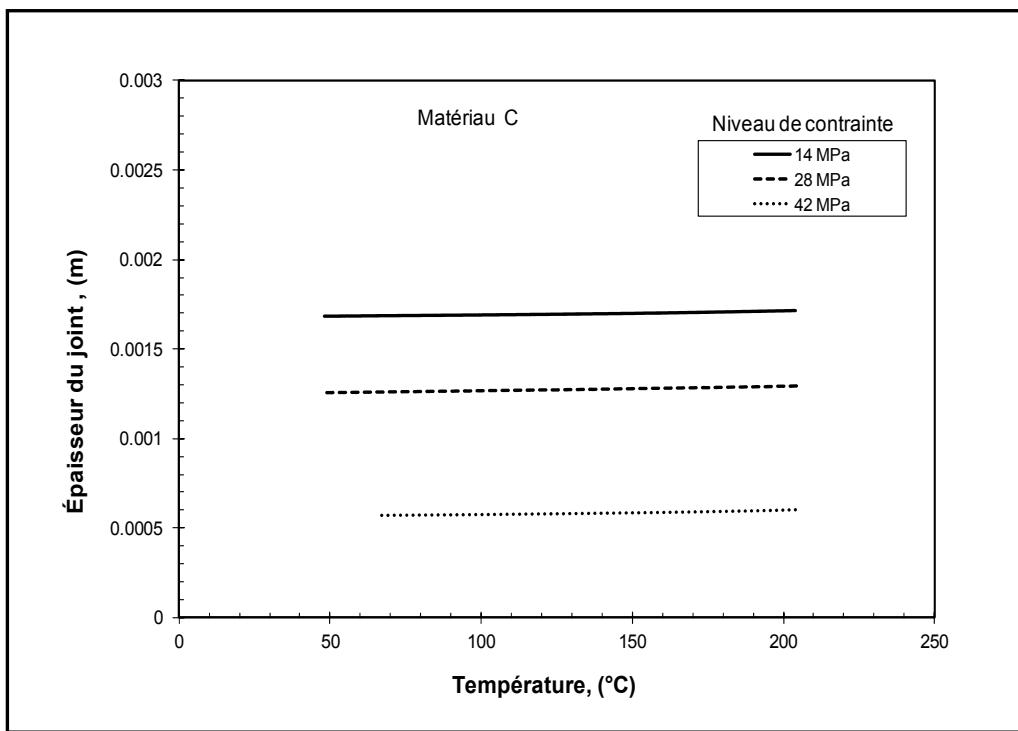


Figure 3.1 Effet de la contrainte sur l'épaisseur du joint C

La figure 3.2 illustre un exemple de l'évolution du fluage sous l'effet de la contrainte appliquée. Nous pouvons constater que les courbes du fluage à 28 et 42 MPa se superposent, contrairement à celles à 14 MPa. Au-delà de 28 MPa, le fluage demeure donc stable. Sur la courbe de la figure 3.3, qui représente l'effet du niveau de contrainte sur la relaxation, nous remarquons que la chute de contrainte sur le joint diminue avec l'augmentation du niveau de contrainte.

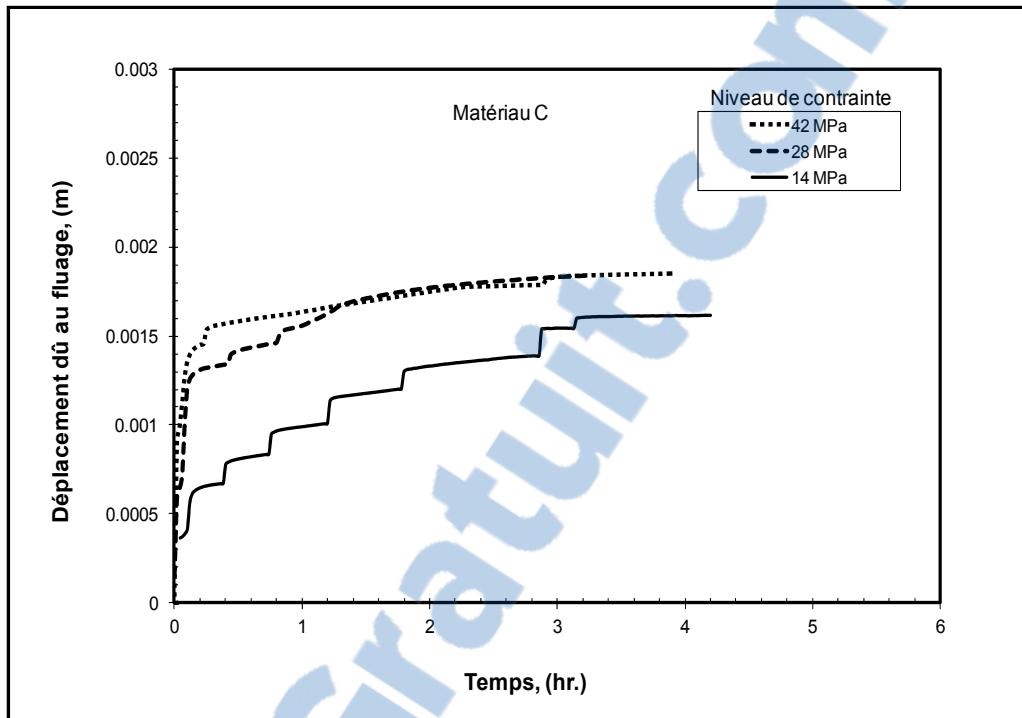


Figure 3.2 Effet de la contrainte sur le fluage du joint C

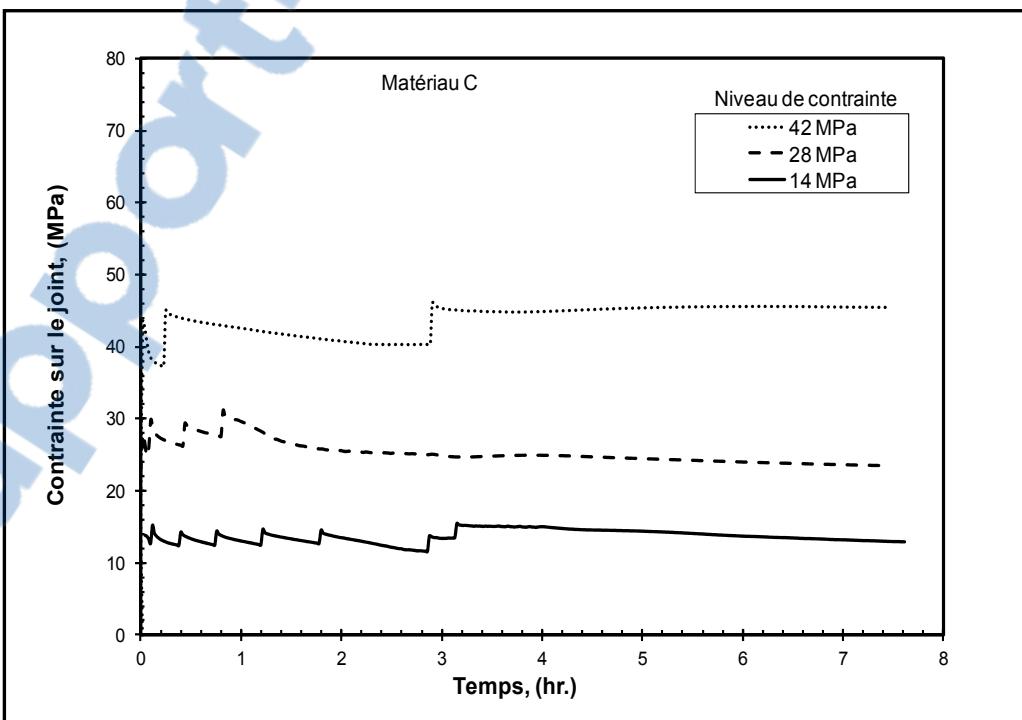


Figure 3.3 Effet de la contrainte sur la relaxation du joint C

Sur la figure 3.4, nous présentons l'évolution du coefficient d'expansion thermique à trois niveaux de contrainte. Il est évident que les courbes suivent une allure semblable à 14 et 28 MPa, avec un écart de 50 % sur toute la plage de température. Toutefois à 42 MPa, l'écart s'accroît avec l'augmentation de la température. Quant à la figure 3.5, qui présente l'évolution de la température de transition vitreuse pour trois niveaux de contrainte, on peut clairement observer que plus le niveau de contrainte augmente, plus T_g augmente. On remarque également un écart négligeable dans le cas des deux niveaux de contrainte 28 MPa et 42 MPa et un écart de 7,5 °C entre les deux niveaux de contrainte 28 MPa et 14 MPa.

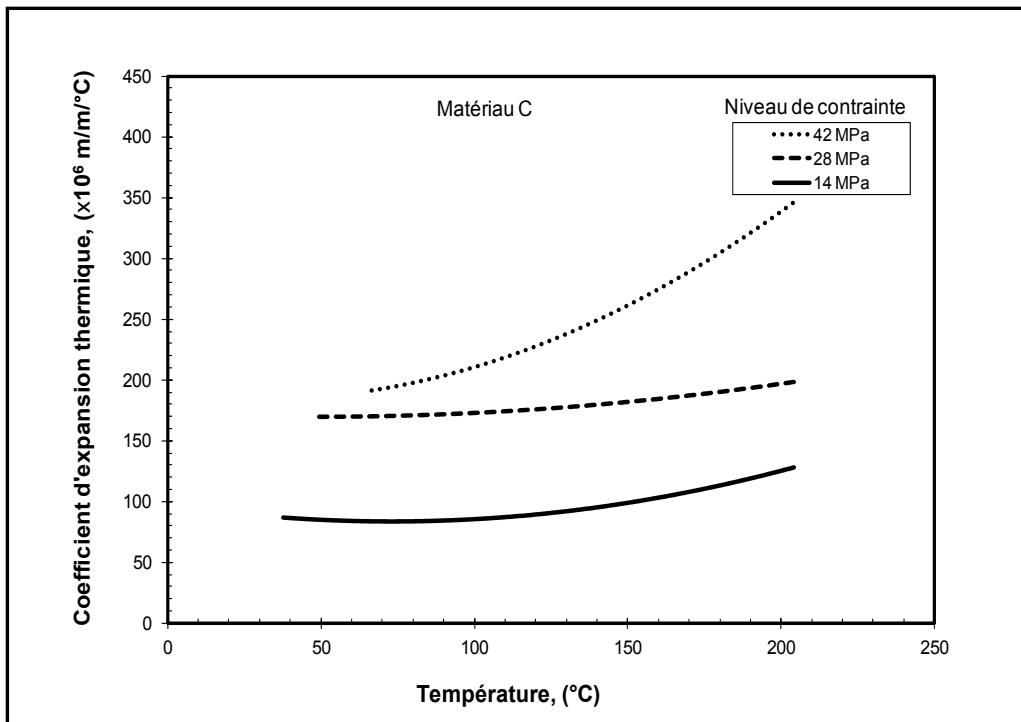


Figure 3.4 Effet de la contrainte sur la variation vitreuse (joint C)

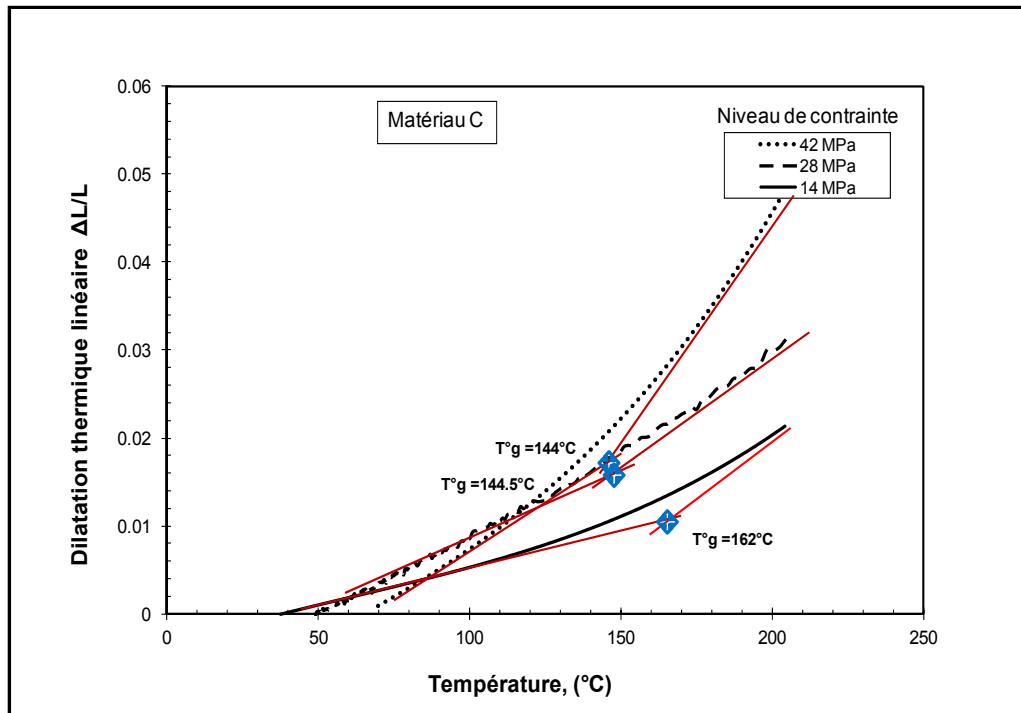


Figure 3.5 Détermination de la température de transition (joint C)

3.2.1.2 Joint mou

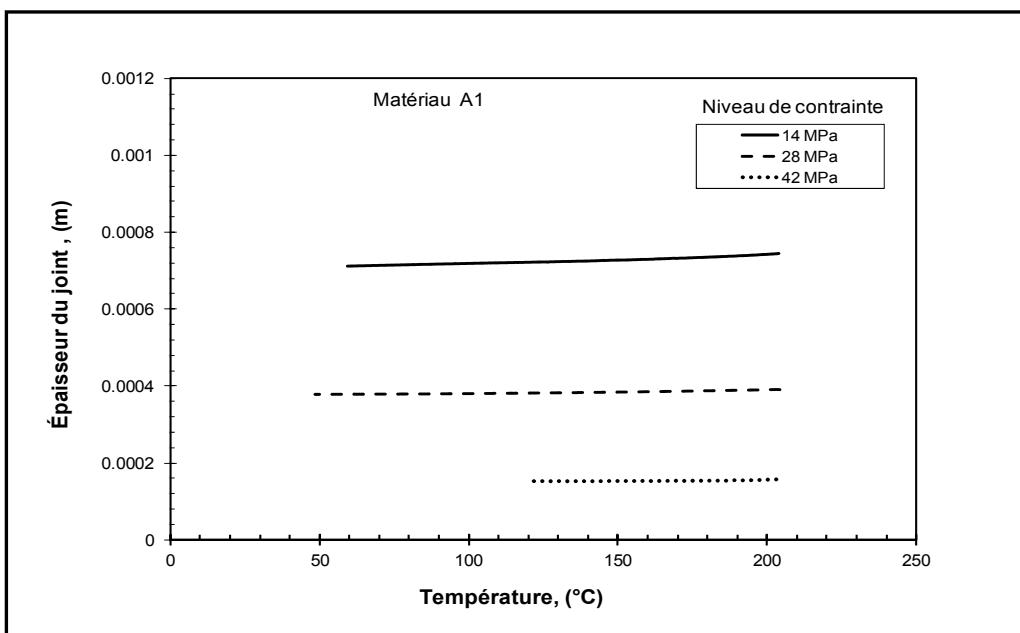


Figure 3.6 Effet de la contrainte sur l'épaisseur du joint A1

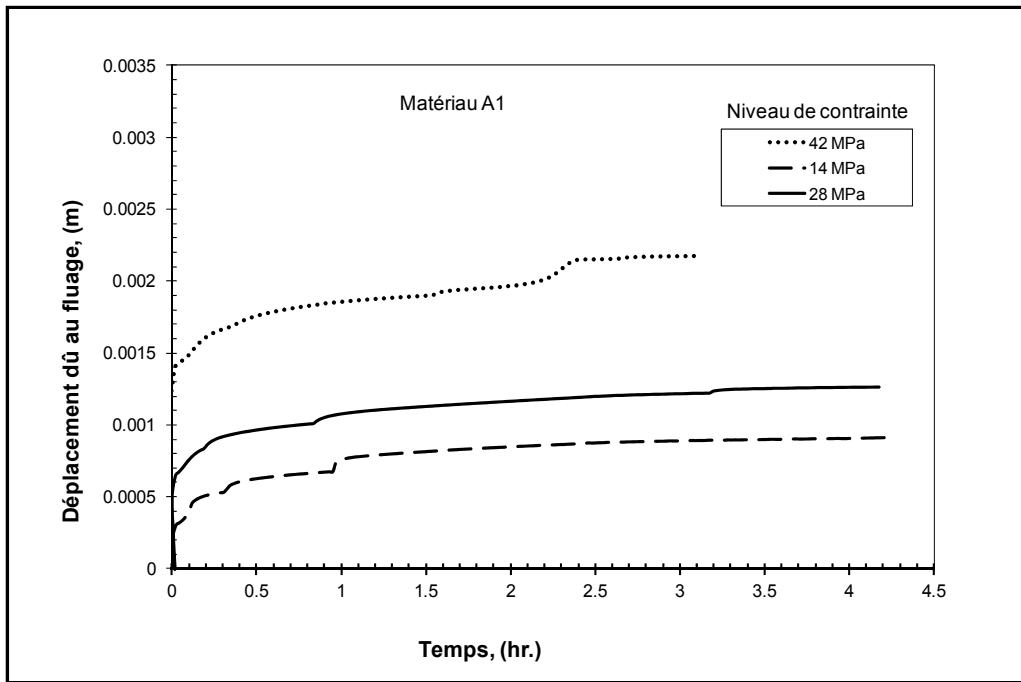


Figure 3.7 Effet de la contrainte sur l'évolution du fluage du joint A1

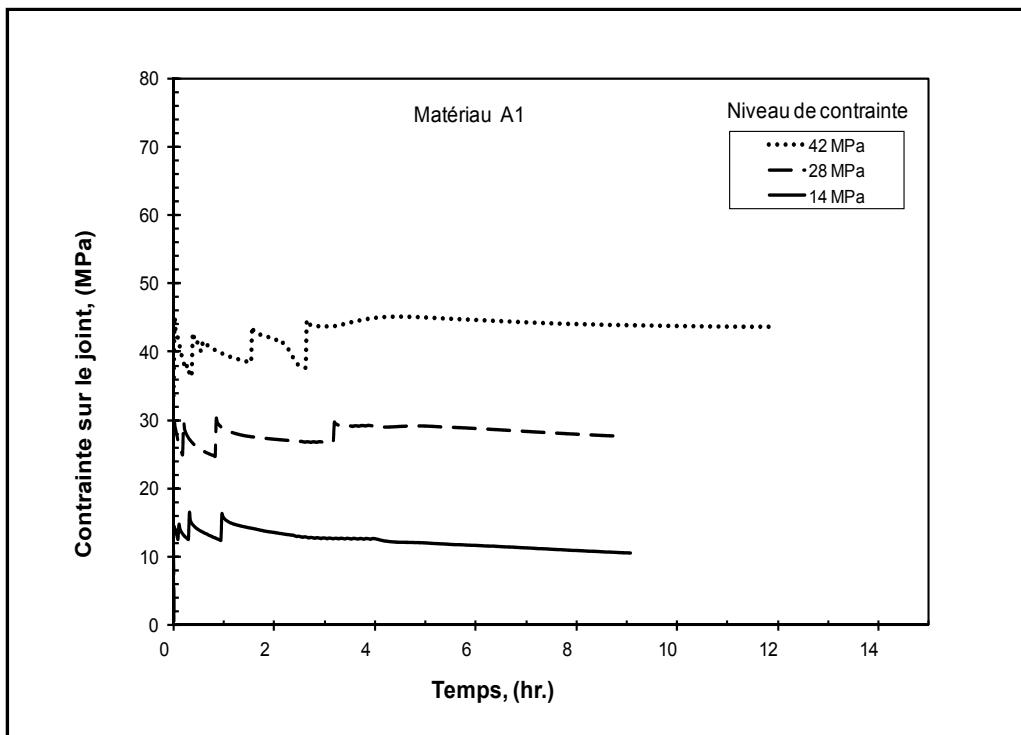


Figure 3.8 Effet de la contrainte sur la relaxation du joint A1

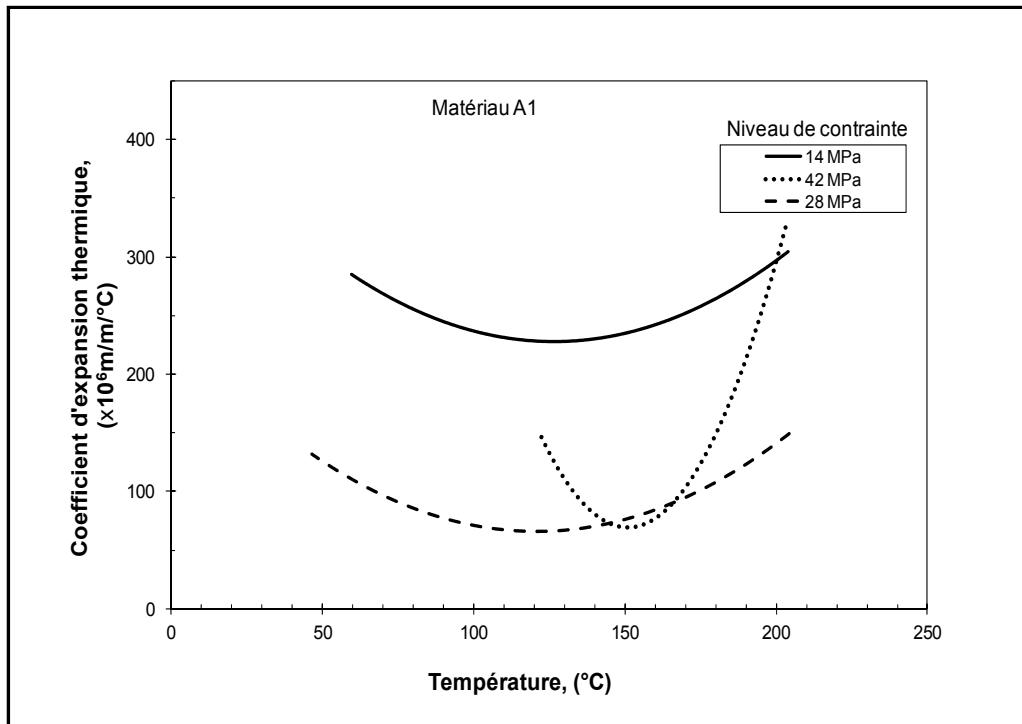


Figure 3.9 Effet de la contrainte sur l'expansion thermique du joint A1

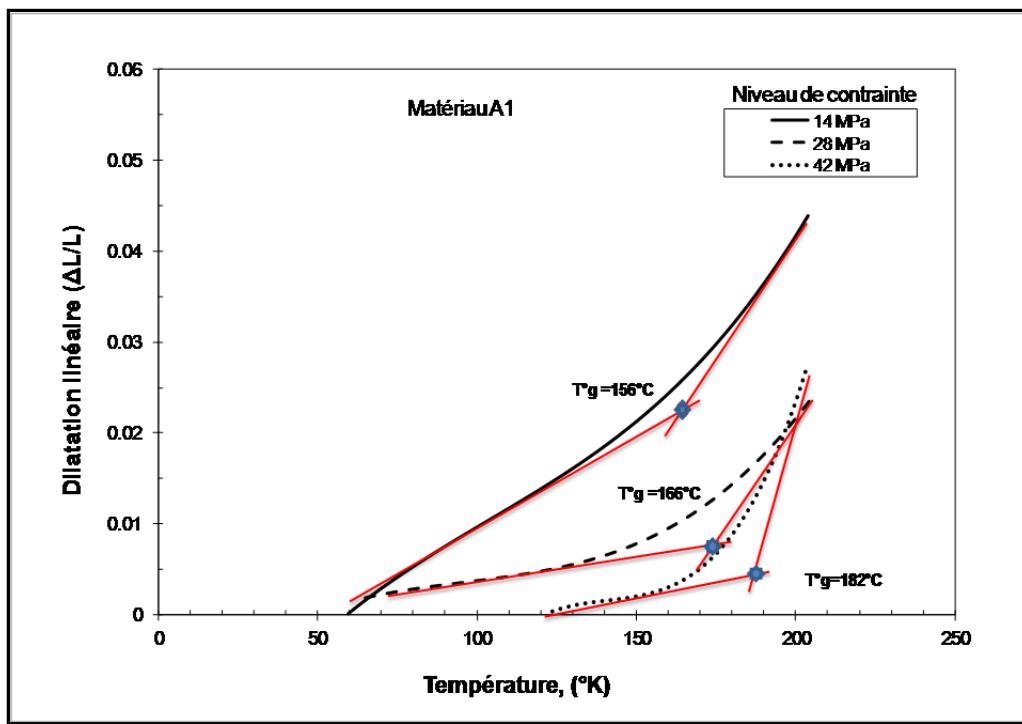


Figure 3.10 Effet de la contrainte sur la température de transition du joint A1

La variation de volume présente, en passant par la température de transition vitreuse, un changement de pente dans son évolution en fonction de la température. Au contraire, le coefficient de dilatation et d'autres paramètres présentent une discontinuité au point de transition. Il en résulte que la transition vitreuse peut être mesurée par le biais de plusieurs méthodes. À cette phase de transition, le matériau se trouve à un état instable.

Comme nous l'avons exposé dans le chapitre précédent, durant les essais le matériau testé est soumis à plusieurs cycles de chauffage, ce qui contribue à la dégradation thermique du matériau. Cette dégradation est la suite d'une modification de sa structure moléculaire. Elle est interprétée par le lien entre le phénomène de fluage et la température de transition vitreuse. Il nous semble que ces grandeurs sont liées en fonction de la théorie du volume libre, qui renforce cette idée puisqu'elle associe au fluage la notion de volume libre.

Les résultats de mesure de la température de transition vitreuse sont en accord avec les travaux d'Araki (1965) et Youxi (2008). Les figures 3.5 et 3.10 illustrent l'effet du niveau de la contrainte sur la détermination de la température de transition vitreuse à l'aide des courbes de dilatation thermique dans le cas des joints rigides et mous. Il en ressort clairement que la température de transition vitreuse varie sur une plage de température se situant entre 144 et 162 °C et entre 156 et 182 °C pour les joints rigides et mous respectivement.

Tableau 3.1 Calculs d'épaisseur aux différentes étapes du test pour les 4 familles des joints

$T^\circ = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$									
Type de joint	Épaisseur initiale (mm)			Épaisseur après serrage			Épaisseur finale (mm)		
	14 MPa	28 MPa	42 MPa	14 MPa	28 MPa	42 MPa	14 MPa	28 MPa	42 MPa
C	3,175	3,063	3,073	2,781	2,362	2,039	1,680	1,206	0,5715
A1	3,176	3,162	3,206	2,971	2,514	2,1844	0,712	0,378	0,152

Les mesures du coefficient d'expansion thermique prises pour les quatre familles de joints sont regroupées dans le tableau 3.1, tandis que les valeurs mesurées du taux de fluage pour les familles de joints (A et C) sont représentées au tableau 3.2.

Tableau 3.2 Paramètres calculés pour les 2 familles de joints

Familles de joint	CET ($\times 10^6$ m/m/°C)			Taux de relaxation (%)			Taux de fluage (%)		
	14 MPa	28 MPa	42 MPa	14 MPa	28 MPa	42 MPa	14 MPa	28 MPa	42 MPa
C	89	182	230	16.2	5.6	1.5	34	37	47
A1	248	96	132	35	8.45	3.22	71	67	63

3.2.2 Effet de la rigidité du matériau

Les figures 3.11 à 3.15 révèlent l'effet de rigidité du matériau de fabrication du joint sur l'évolution du fluage, du coefficient d'expansion thermique et de la température de transition vitreuse. Il apparaît que les données obtenues pour le coefficient d'expansion thermique, le fluage et la température de transition vitreuse des matériaux, de même que pour la rigidité, sont avoisinantes.

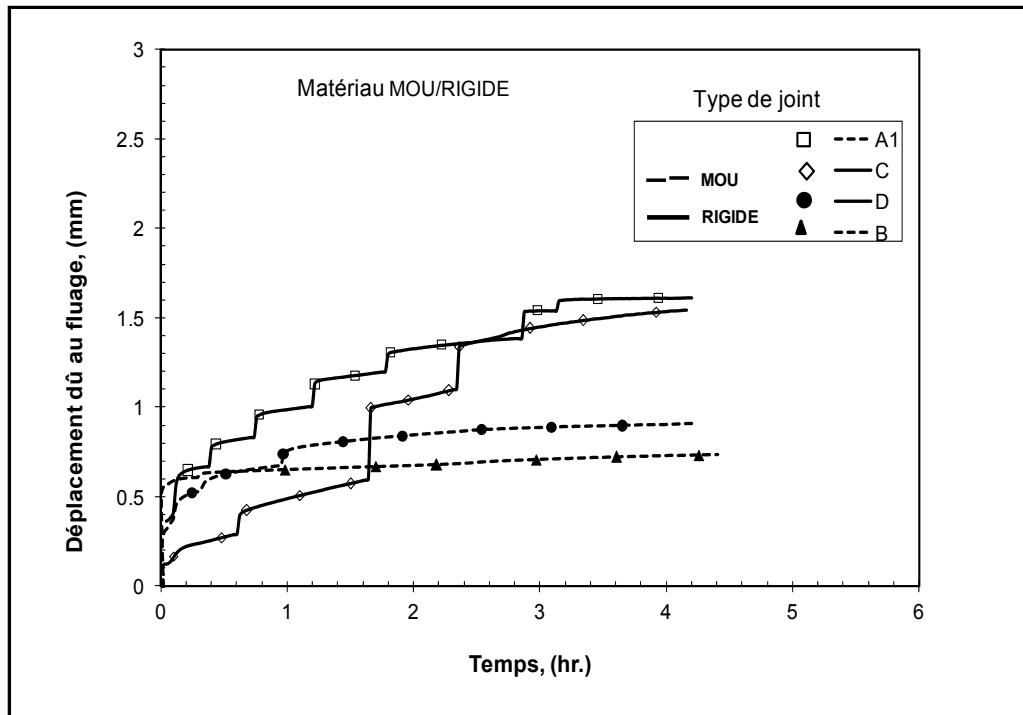


Figure 3.11 L'évolution du fluage pour des matériaux rigides et mous

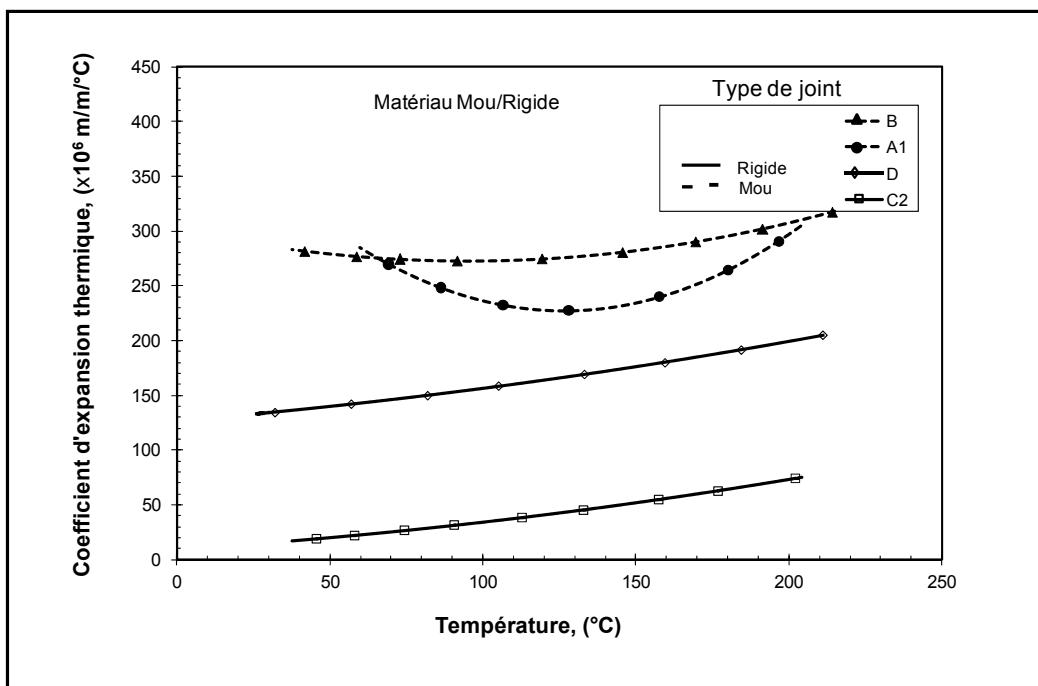


Figure 3.12 L'évolution du CET pour des matériaux rigides et mous

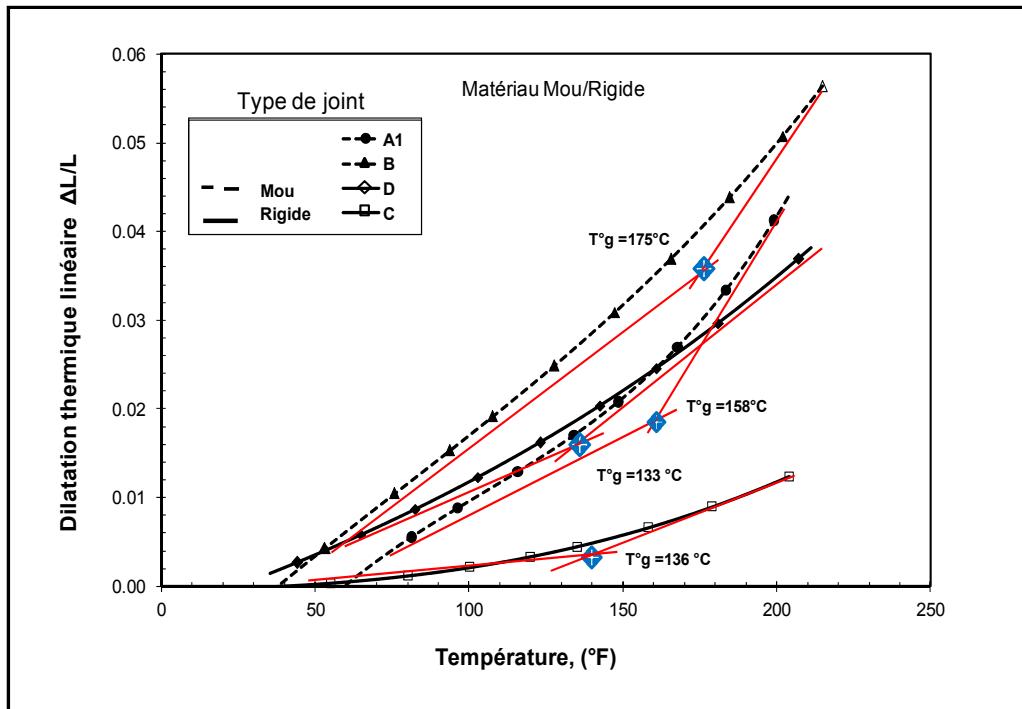


Figure 3.13 Détermination de la température de transition vitreuse $T^{\circ}\text{g}$ pour les matériaux mous et rigides

3.2.3 Effet de la température

La variation de la température influence les valeurs d'un très grand nombre de paramètres comme l'écrasement du joint, l'évolution du fluage et de la relaxation du joint, l'expansion thermique et la température de transition vitreuse. Des essais ont été effectués à 200°C et 260°C . Les courbes 3.14 à 3.18 indiquent l'effet de la température sur les paramètres déjà mentionnés, dans le cas des joints rigides. Les figures 3.19 à 3.23 illustrent pour leur part l'effet de la température dans le cas des joints mous.

Les résultats montrent clairement que la température a un effet significatif sur les caractéristiques mécaniques et thermiques dans le cas des deux types de joint rigide et mou. Effectivement, un écart important est observé entre l'essai à 200°C et celui de 260°C .

3.2.3.1 Joints rigides

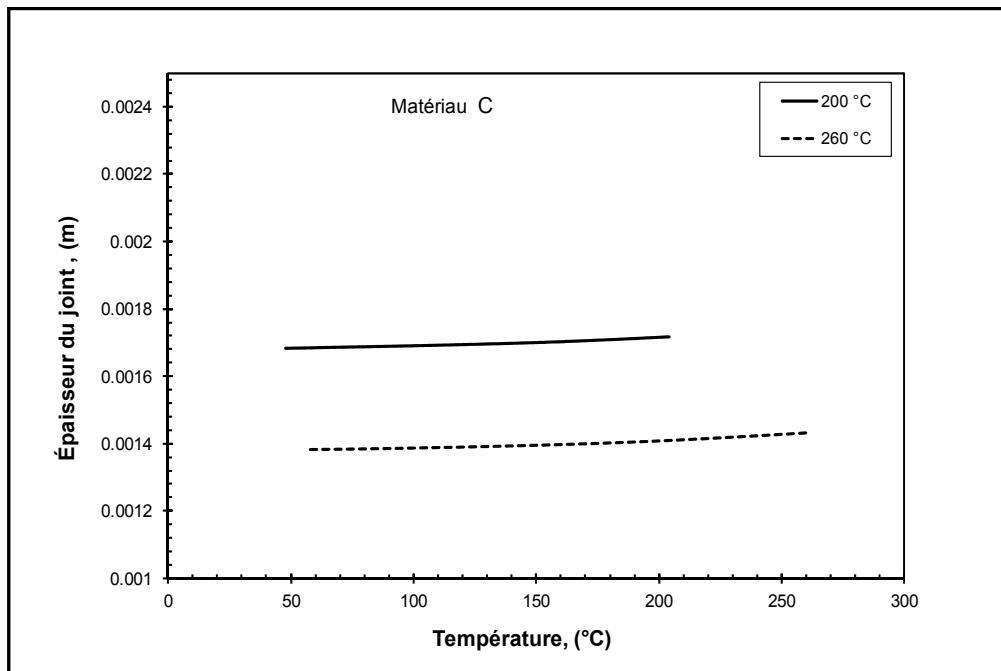


Figure 3.14 Effet de la température sur l'épaisseur du joint

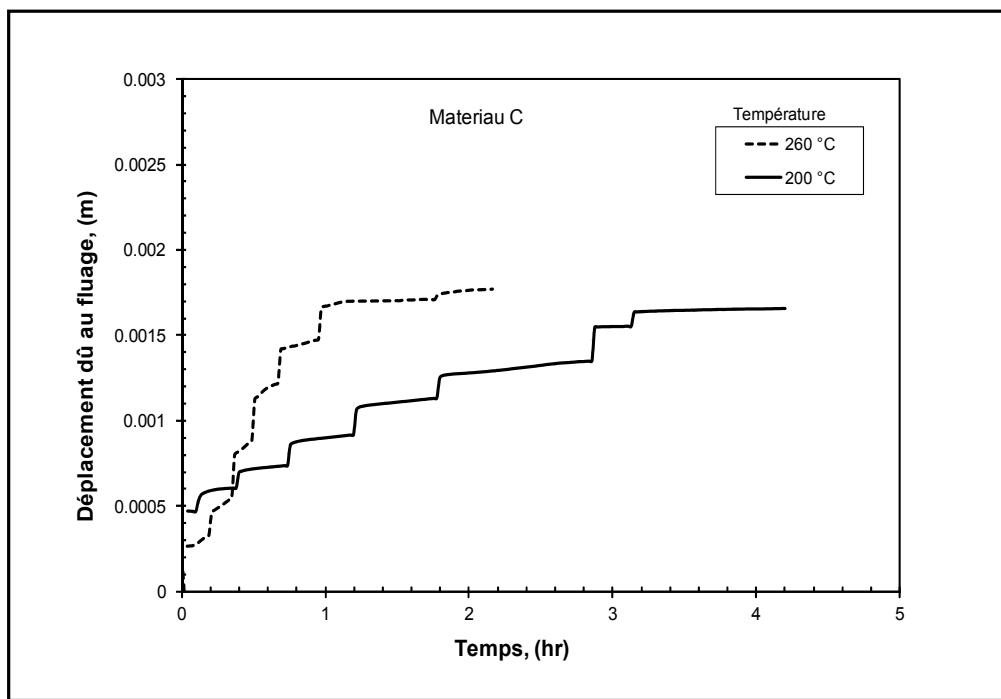


Figure 3.15 Effet de la température sur le fluage du joint

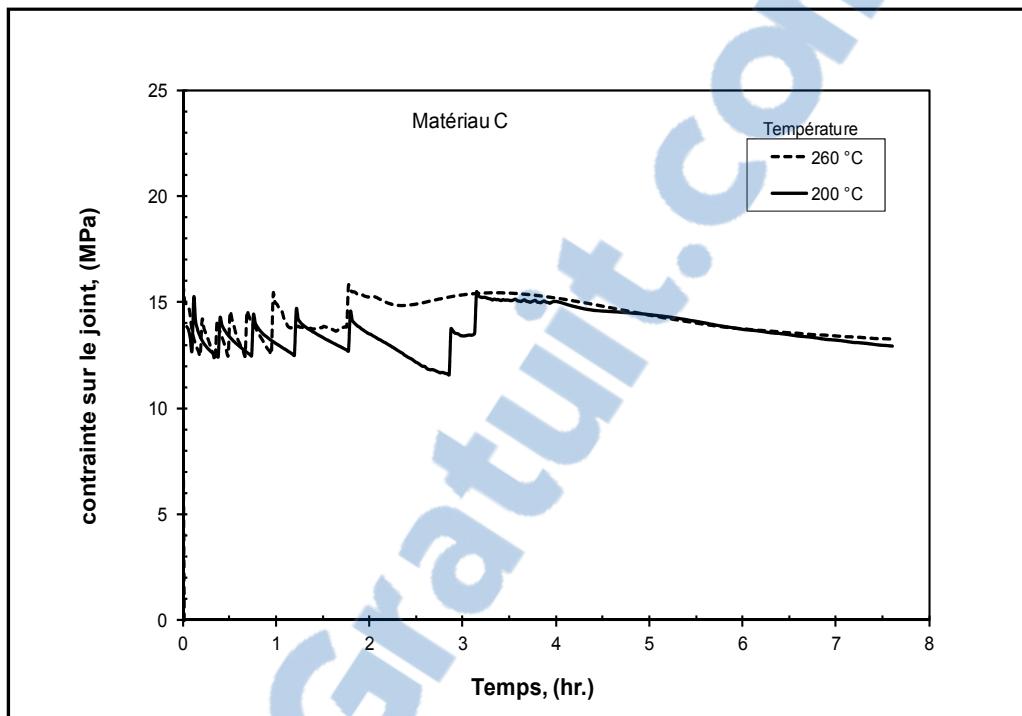


Figure 3.16 Effet de la température sur la relaxation du joint

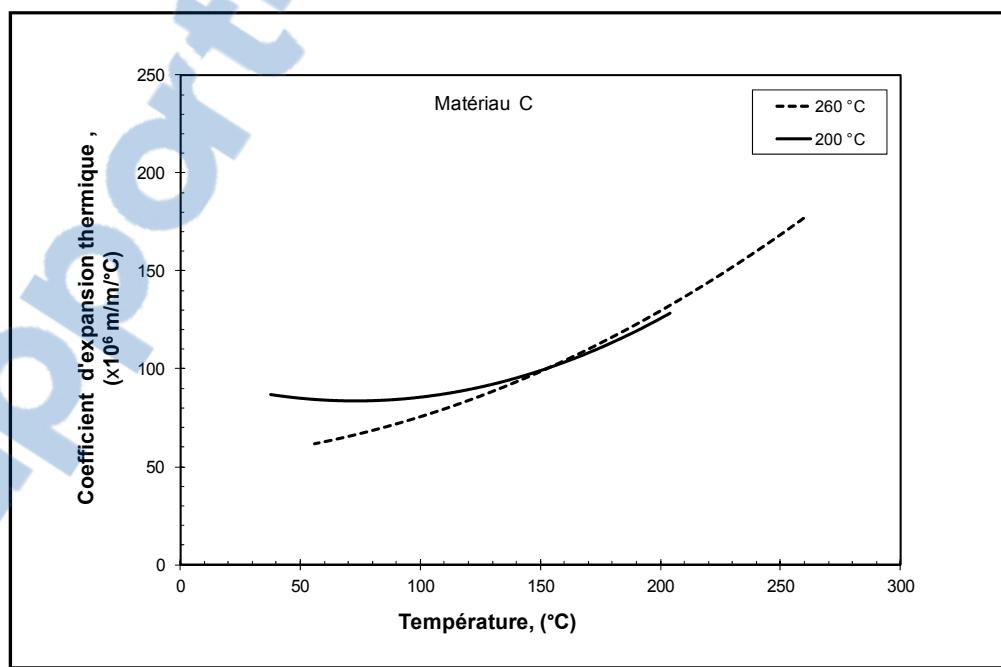


Figure 3.17 Effet de la température sur le coefficient d'expansion thermique du joint

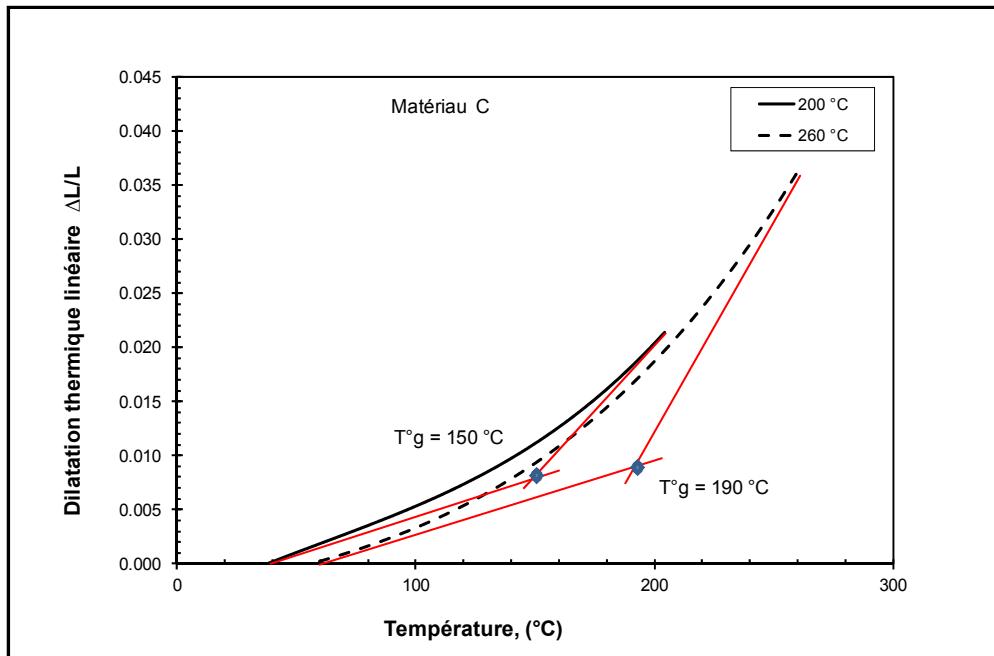


Figure 3.18 La température de transition sous l'effet de la température

3.2.3.2 Joints mous

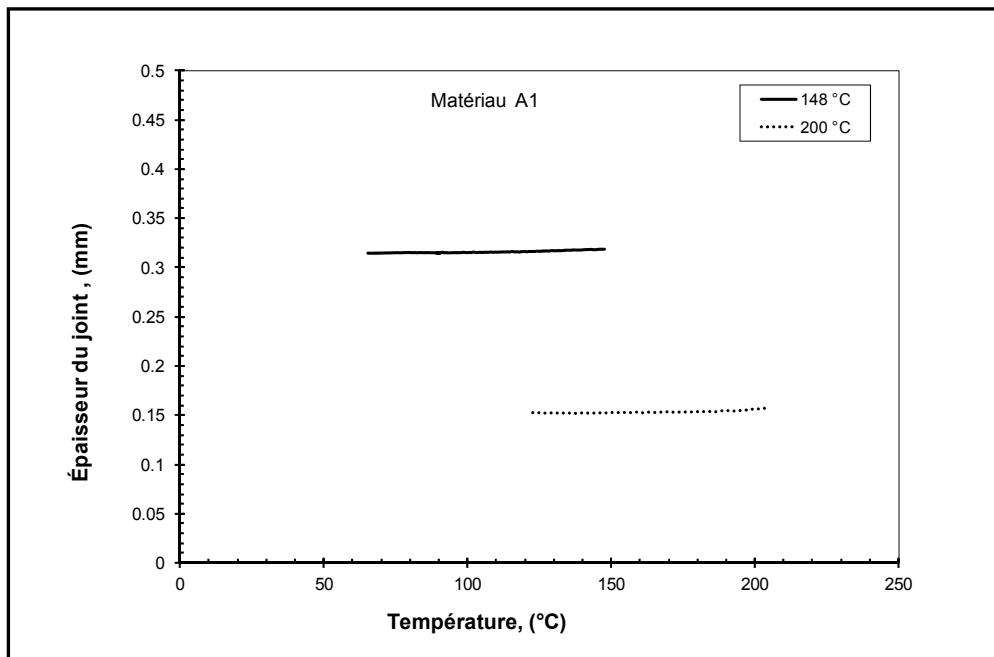


Figure 3.19 Effet de la température sur l'épaisseur du joint

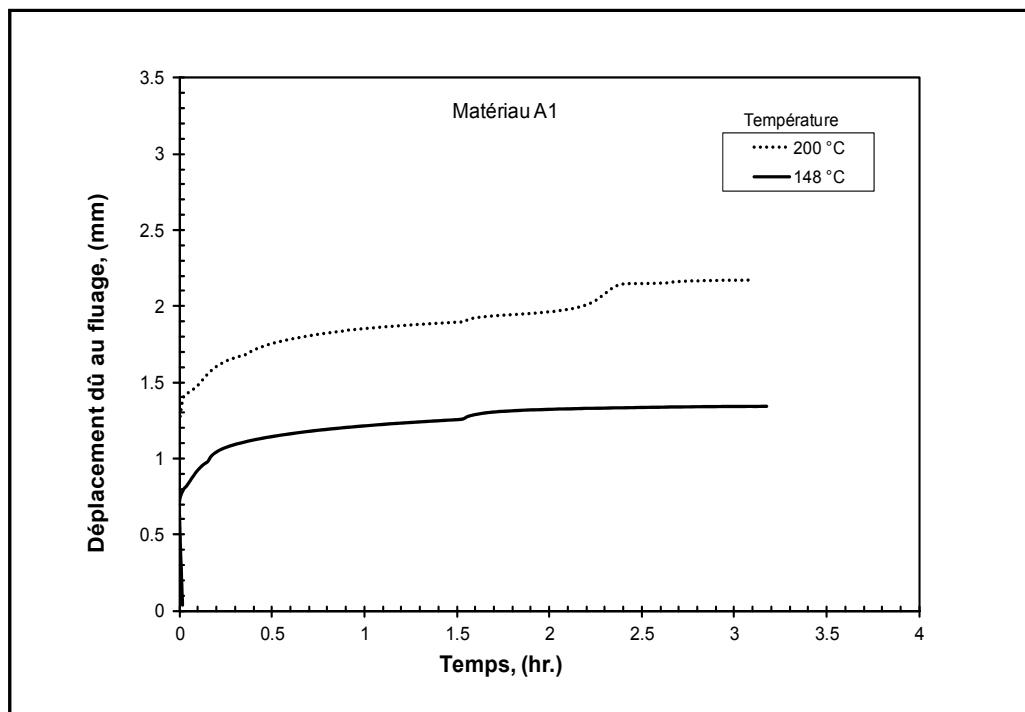


Figure 3.20 Effet de la température sur l'évolution du fluage du joint A1

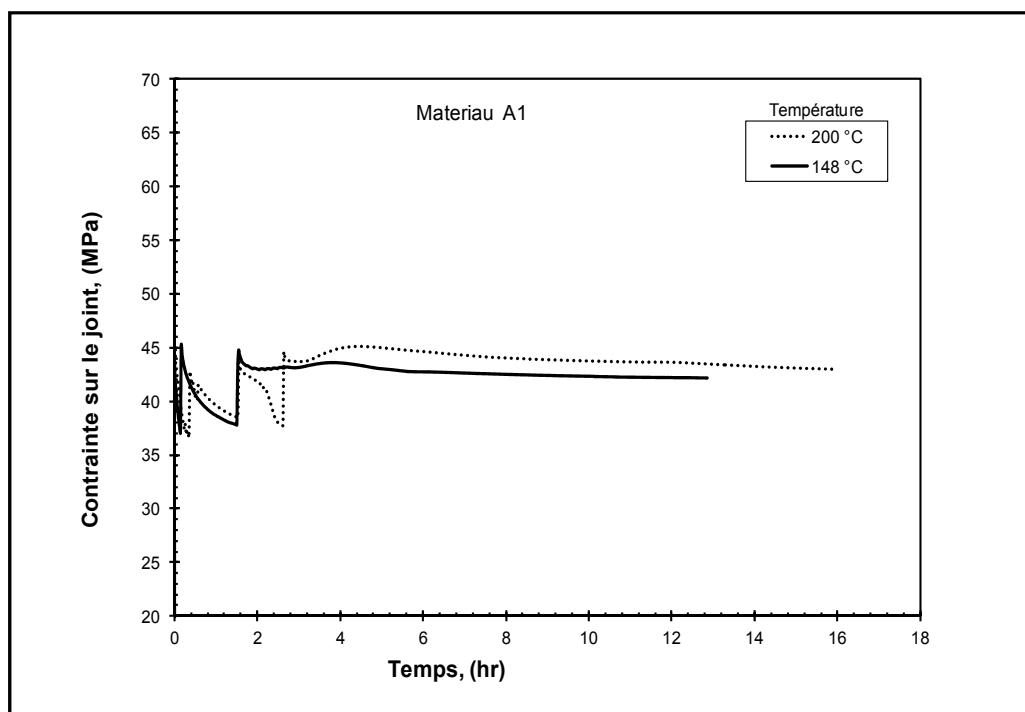


Figure 3.21 Effet de la température sur l'évolution de la relaxation du joint A1

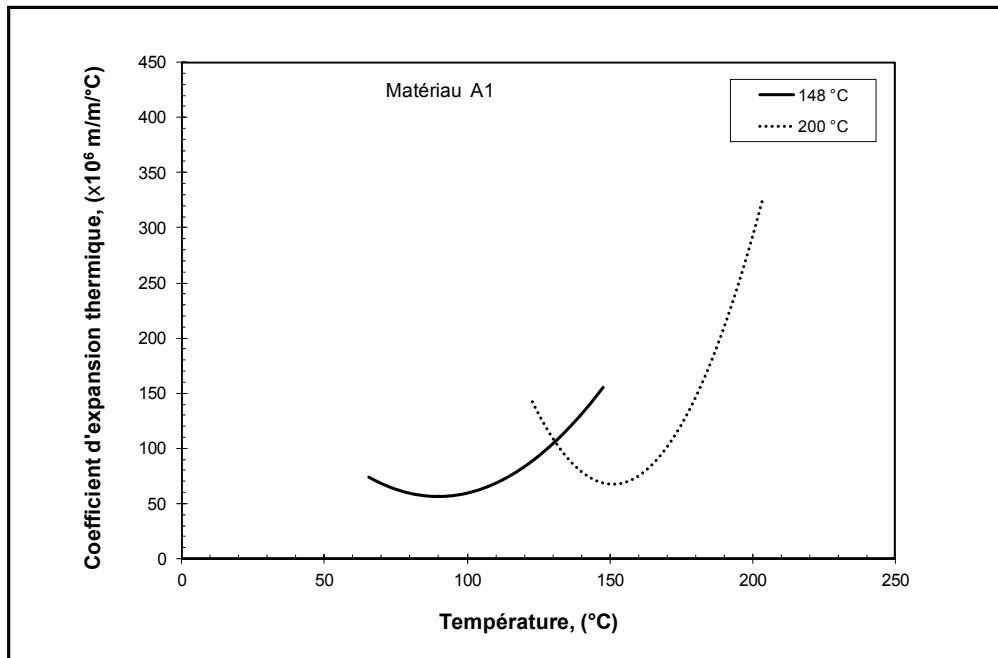


Figure 3.22 Effet de la température sur l'expansion thermique du joint

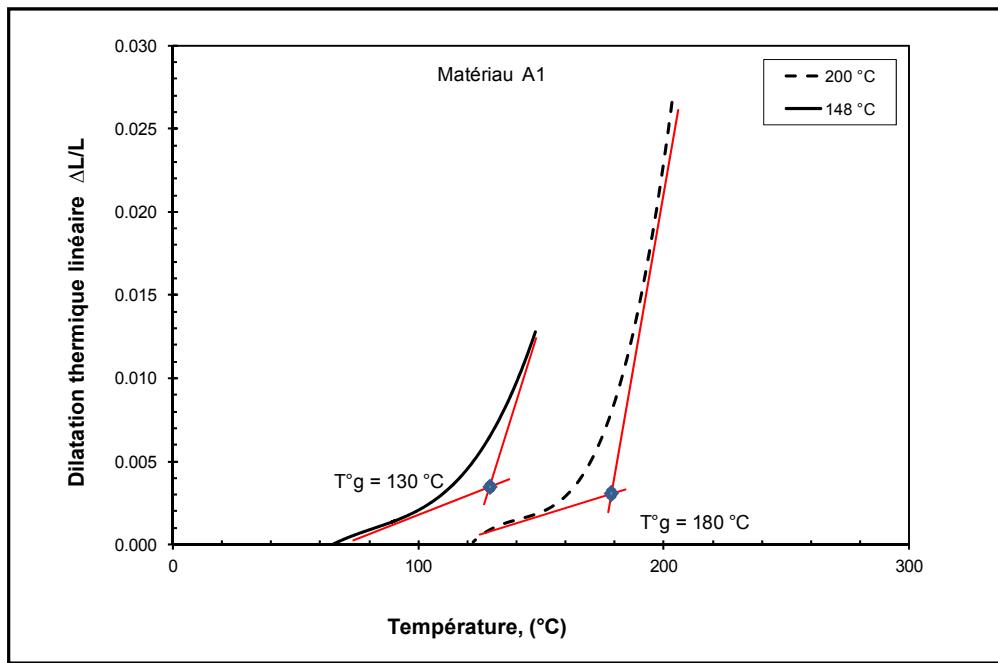


Figure 3.23 Détermination de la température de transition sous l'effet de la température

3.2.4 Effet du nombre de cycles de chauffage

Les figures 3.24 à 3.28 montrent l'effet du nombre de cycles de chauffage sur différents paramètres, tels que le fluage et la relaxation, de même que sur le coefficient de dilatation thermique. Soulignons que les tests ont été effectués à 14 MPa. Les résultats nous amènent à constater qu'il y a très peu d'effet sur le coefficient de dilatation thermique, puisque les deux courbes se superposent l'une sur l'autre. Le coefficient de dilatation thermique augmente avec la température. Les écrasements du joint sont légèrement plus élevés (c'est-à-dire que l'épaisseur du joint est plus faible) après le premier cycle; ceci est attribuable à la densification du matériau. Il n'y a pratiquement pas de fluage après le premier cycle de chauffage. En effet, l'écrasement du joint est stable (figure 3.24), tel qu'il a été observé par Bouzid et al. 2003. Les courbes de relaxation sont sensiblement similaires après le premier cycle de chauffage, tandis que la courbe d'évolution du coefficient d'expansion thermique en fonction de la température suit la même allure pour les trois cycles au-delà de la température 145 °C. Cependant, pour la détermination du T_g , l'écart est négligeable pour le premier et le deuxième cycle et il y a un écart de 20 °C entre le deuxième et le troisième cycle.

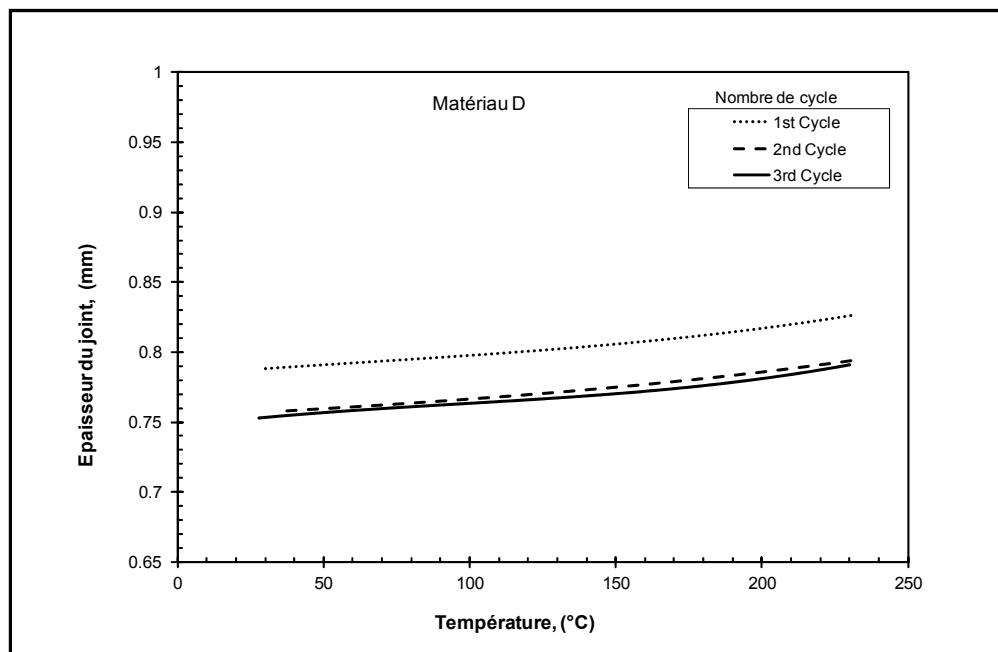


Figure 3.24 Effet des cycles sur l'épaisseur du joint

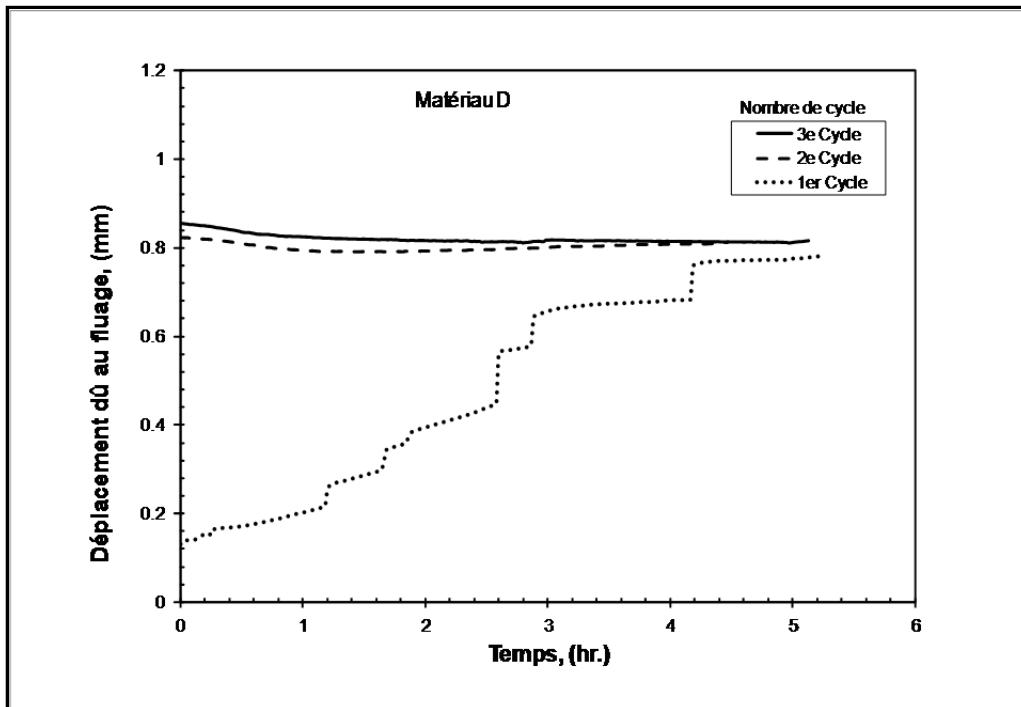


Figure 3.25 Effet des cycles sur la variation du fluage

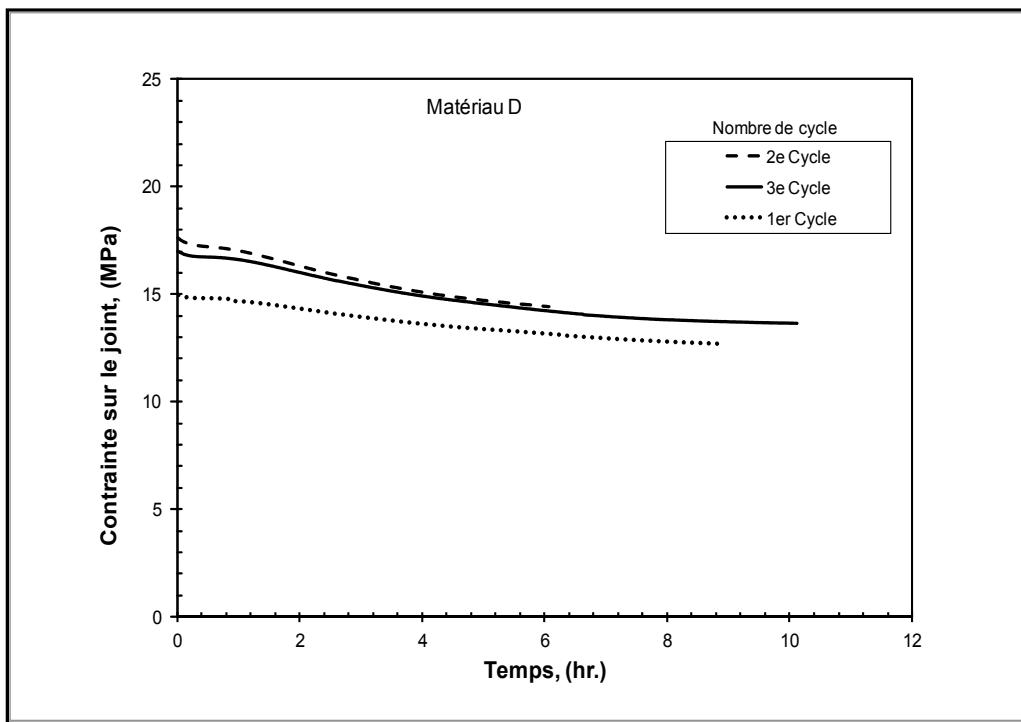


Figure 3.26 Effet des cycles sur la relaxation du joint

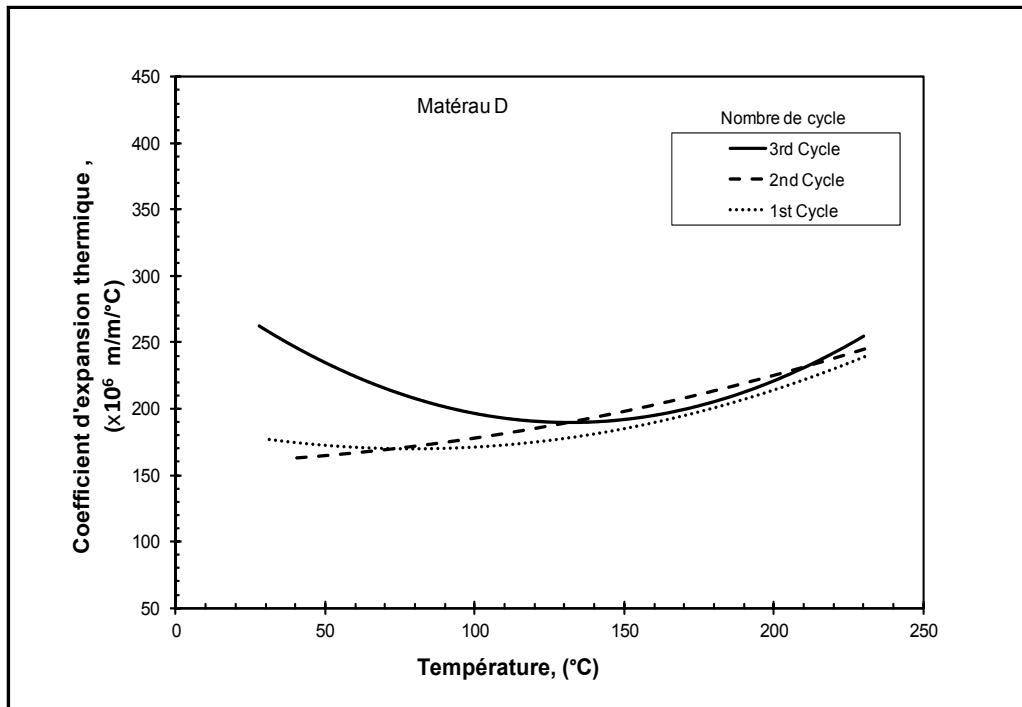


Figure 3.27 Effet des cycles sur la variation du coefficient d'expansion

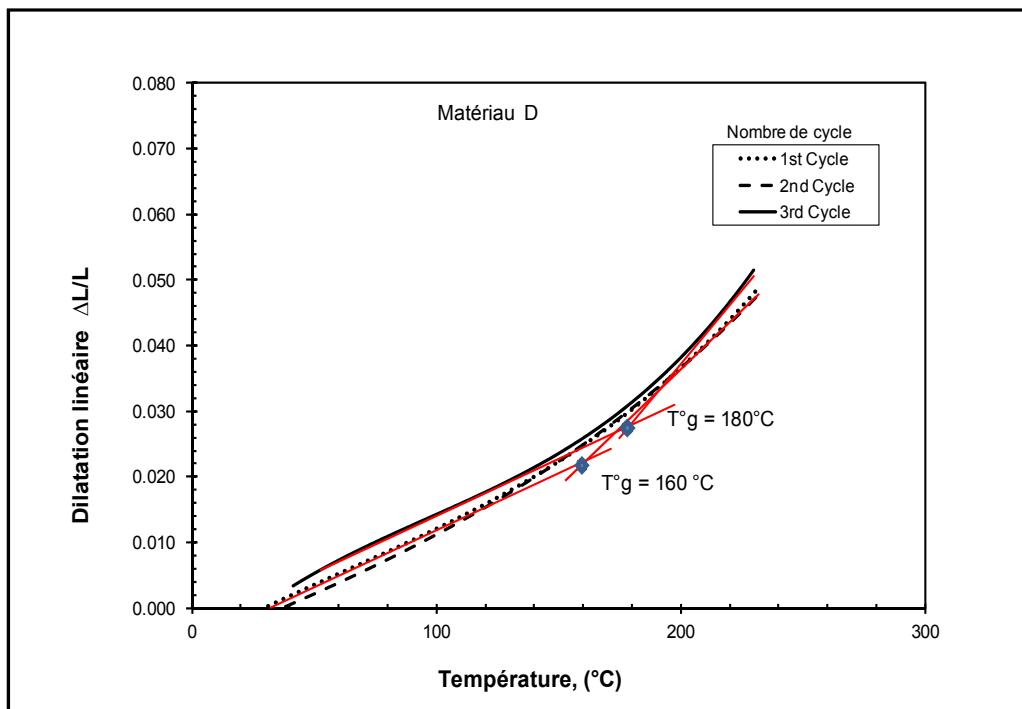


Figure 3.28 Détermination de la température de transition sous l'effet des cycles

3.2.5 L'effet de la vitesse de chauffage

Les figures 3.29 à 3.33 illustrent l'effet du taux de chauffage sur le fluage et la relaxation, ainsi que sur le coefficient de dilatation thermique. Les tests ont été réalisés à 1 °C/min, 3 °C/min et 6 °C/min, sous une contrainte de 14 MPa. Le matériau D ne montre pas de différence significative entre l'essai à 1 °C/min et celui à 6 °C/min. Cependant à 3 °C/min, même si l'allure des courbes est très proche des deux autres taux de chauffage, une différence faible, mais non négligeable entre celles-ci est observée. Nous supposons que la base de référence des mesures de déplacement d'essai à 3 °C/min est la cause de cette différence. Un autre facteur digne de mention constitue la stabilisation de la charge et le contrôle. Avec l'essai de fluage, le banc d'essai UGR avec le montage TECT ne peut réellement maintenir une contrainte constante, même avec la mise en place des rondelles Belleville. Lorsque c'était possible et requis, la charge a été réajustée. Les valeurs du coefficient de dilatation thermique ont été évaluées durant le refroidissement, qui s'échelonnait sur une période pouvant aller jusqu'à 12 heures puisque celui-ci s'effectue par convection naturelle.

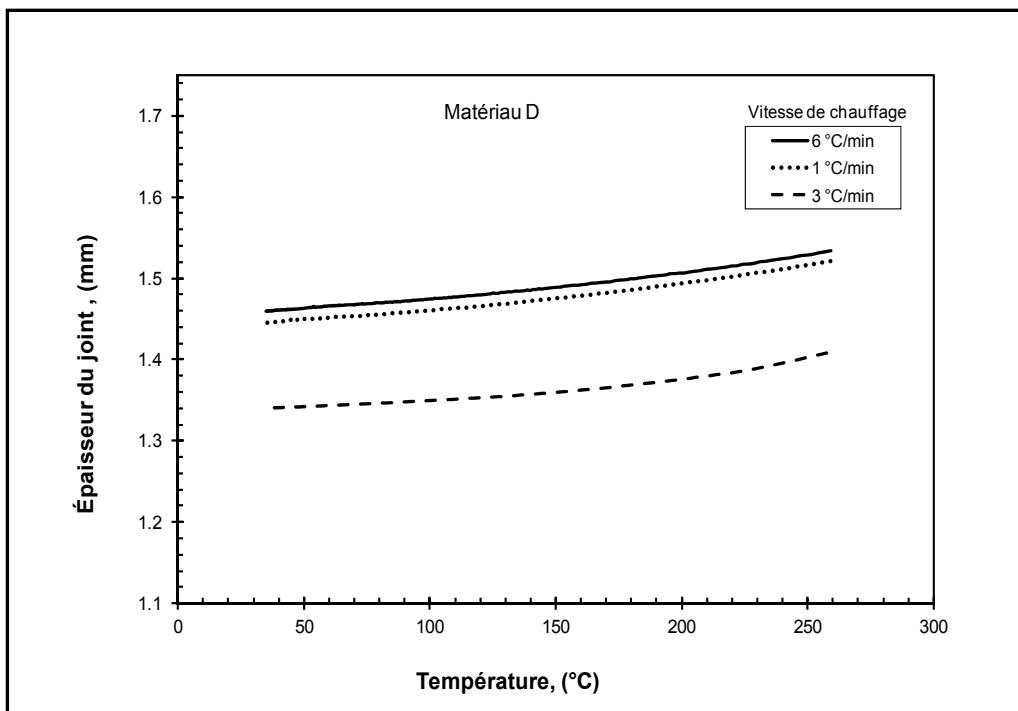


Figure 3.29 Effet de la vitesse de chauffage sur l'épaisseur du joint

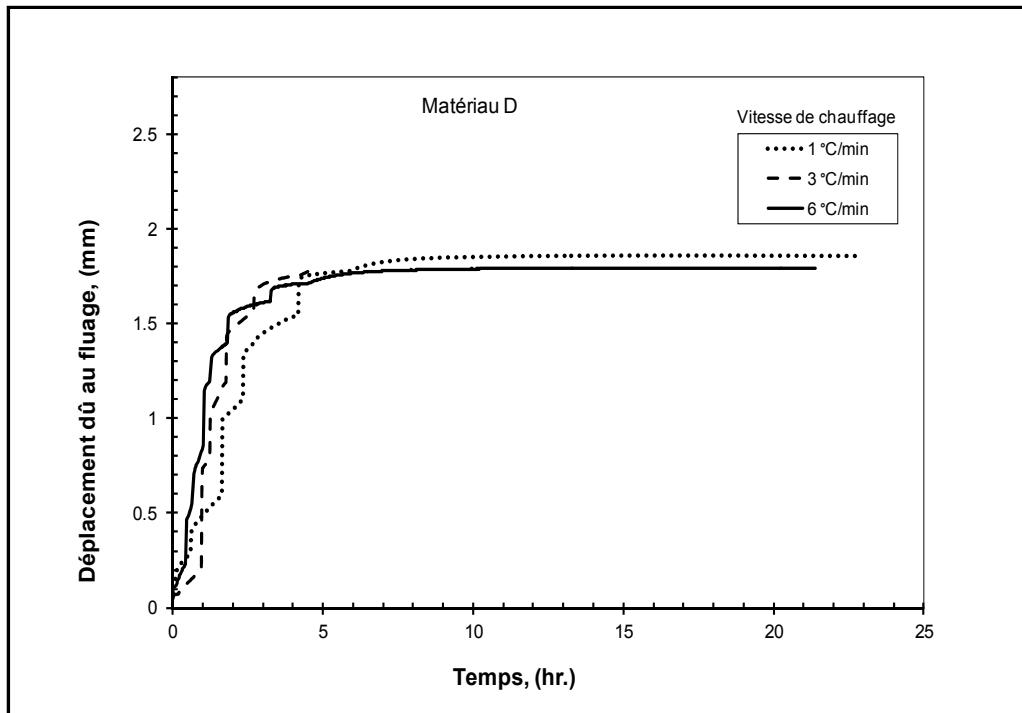


Figure 3.30 Effet de la vitesse de chauffage sur le fluage

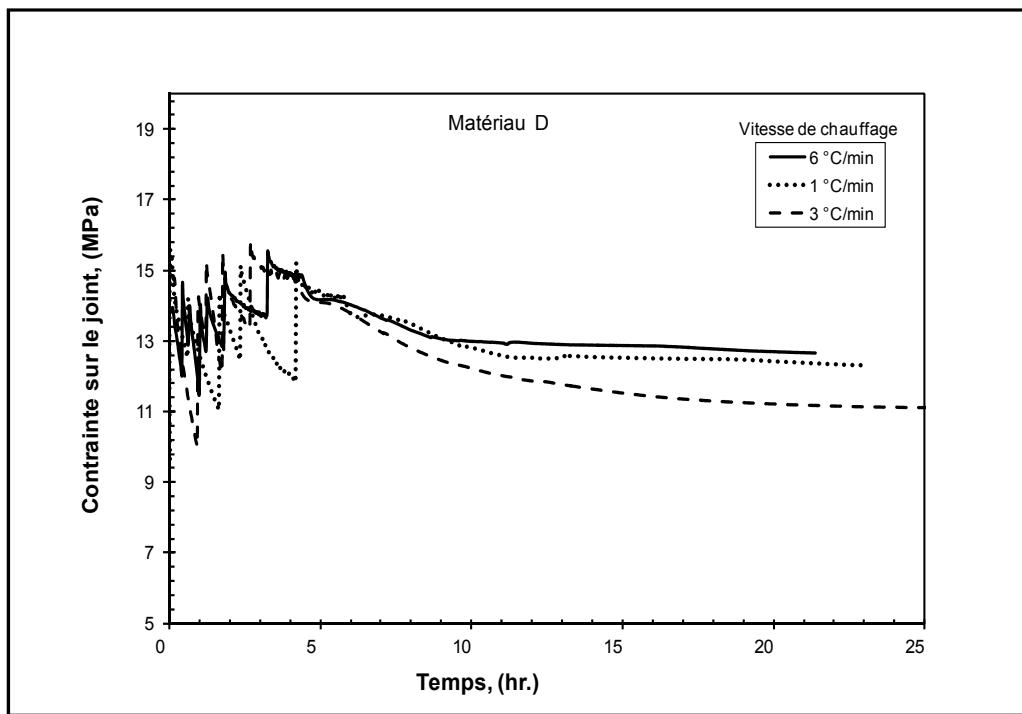


Figure 3.31 Effet de la vitesse de chauffage sur la relaxation

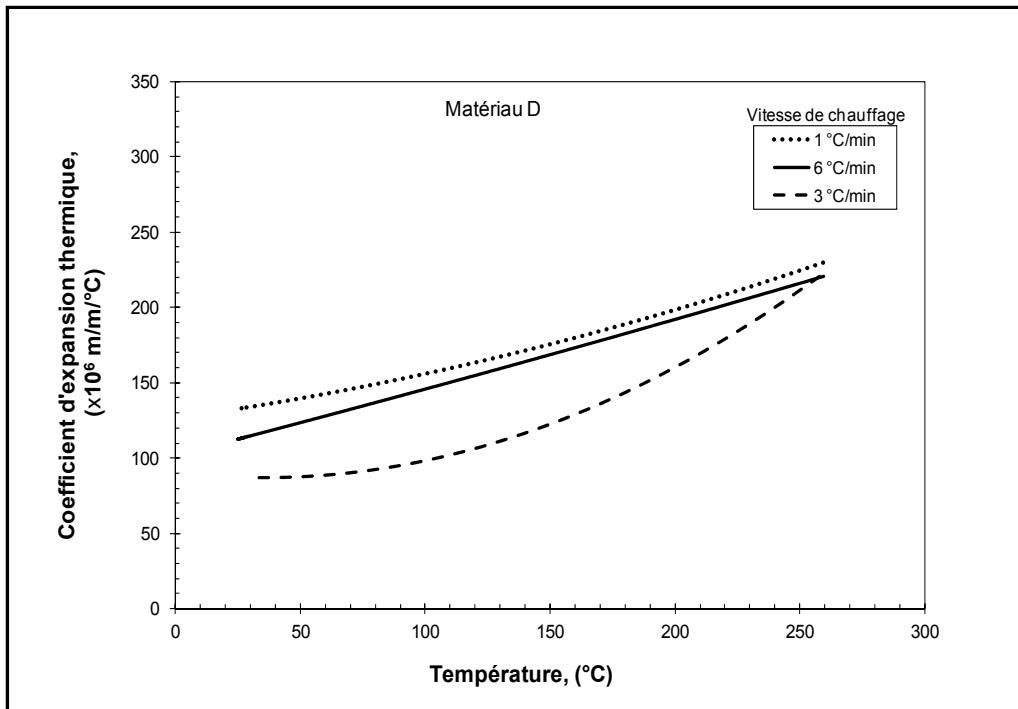


Figure 3.32 Effet de la vitesse de chauffage sur l'évolution de l'expansion thermique

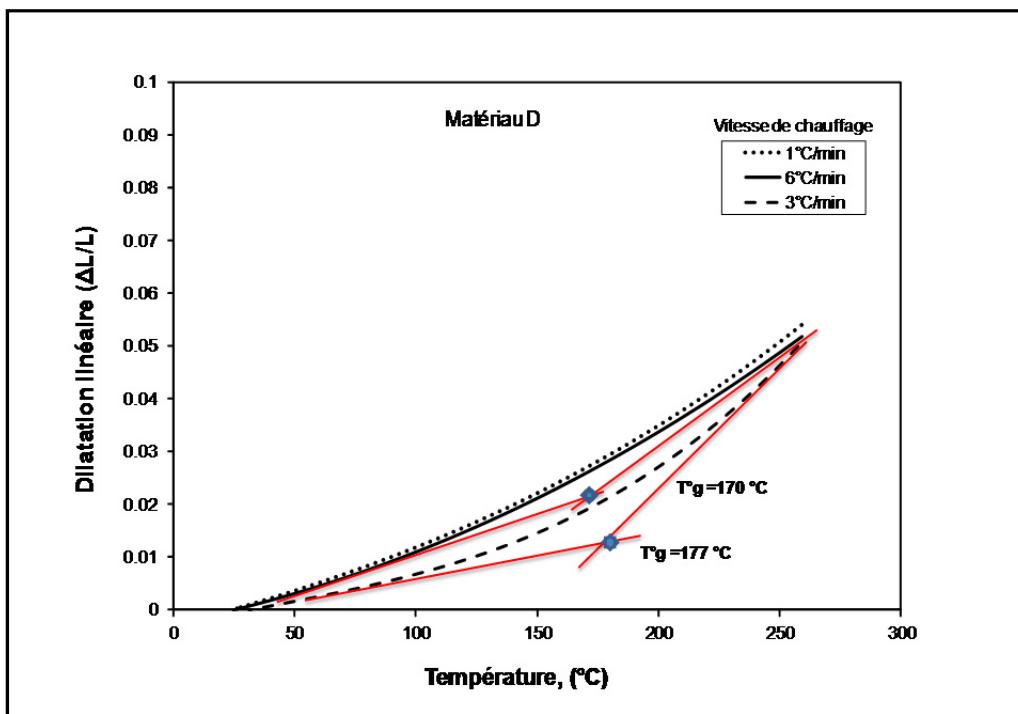


Figure 3.33 La température de transition sous l'effet de la vitesse de chauffage

Les figures 3.29 à 3.33 mettent bien en évidence l'écrasement du joint dû au fluage du matériau D avec les trois rampes de chauffage ($1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$, $3\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ et $6\text{ }^{\circ}\text{C/min}$). Ce déplacement engendré par le fluage augmente avec la vitesse, mais il semble se stabiliser lorsque la température est maintenue constante, comme le montrent les essais représentés à la figure 3.32. Ces données peuvent être très utiles pour la prévision de la relaxation des joints. Les calculs obtenus pour le coefficient d'expansion thermique sont présentés au tableau 3.3.

Tableau 3.3 Évaluation du CET

CET ($\times 10^6\text{m/m}^{\circ}\text{C}$)		
14 MPa	28 MPa	42 MPa
88	181	230
151	102	167
280	226	180
248	95	131

3.3 Résultats des essais HOBT

Durant cette étude expérimentale, six familles de joints ont été utilisées, comme nous l'avons déjà mentionné dans le programme des tests. Il existe plusieurs facteurs pouvant affecter les valeurs mesurées par le banc d'essai HOBT2 amélioré, tels que la contrainte appliquée, la température, le nombre de cycles et la pression interne du fluide pressurisé.

3.3.1 Les facteurs influençant les performances du joint

3.3.1.1 Effet de la contrainte initiale

Les figures 3.34 à 3.38 exposent les résultats obtenus par les essais HOBT standards sans cycle de chauffage, qui montrent l'effet de la contrainte sur les caractéristiques mécaniques et thermiques du joint A1 avec une épaisseur de 1,5875 mm. Les tests ont été entrepris sous les contraintes initiales de 20, 34 et 48 MPa. L'analyse de ces résultats révèle que le fluage-

relaxation varie pour les trois niveaux de contrainte, le joint sous la contrainte 20 MPa ne présentant pratiquement pas de fluage par rapport aux deux autres cas de contraintes initiales plus élevées (43 et 48 MPa). Le déplacement dû au fluage augmente avec la température, mais il semble se stabiliser une fois que la température est maintenue constante.

La figure 3.35 montre l'effet de la contrainte du joint sur la déformation cumulée au cours de l'essai. On voit nettement que le taux de déformation dépend de la contrainte appliquée, car il augmente avec la contrainte initiale de serrage. Le tableau ci-dessous propose une récapitulation des caractéristiques des joints sous l'effet de contraintes.

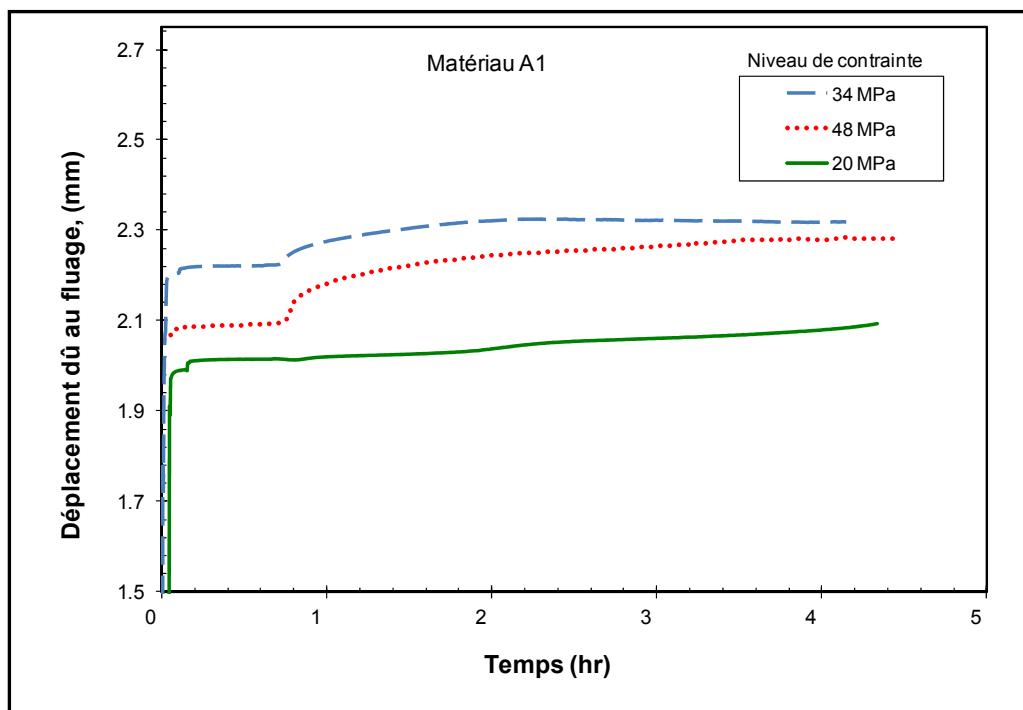


Figure 3.34 Impact de la contrainte sur l'évolution du fluage

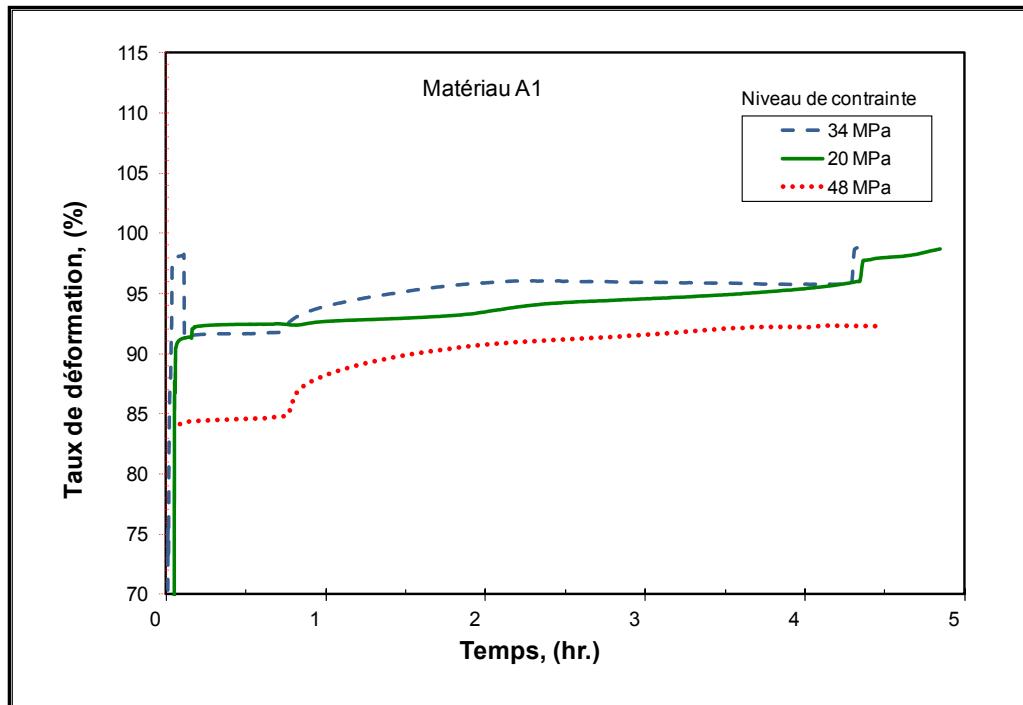


Figure 3.35 L'effet de la contrainte sur la déformation cumulée

Tableau 3.4 Les caractéristiques des joints à différents niveaux de contraintes

Caractéristiques du joint		Niveaux de contraintes (MPa)		
		20	34	48
Épaisseur du joint au cours du test (mm)	$E_p(i)$	2,8702	3,2512	2,794
	$E_p(c)$	0,9017	1,08712	0,72644
	$E_p(f)$	0,72898	0,75184	0,33782
Taux de compressibilité (%)		68,66	66,72	74
Taux de fluage (%)		6	10,3	14
Taux de défor. cumulée (%)		74,67	77,022	88

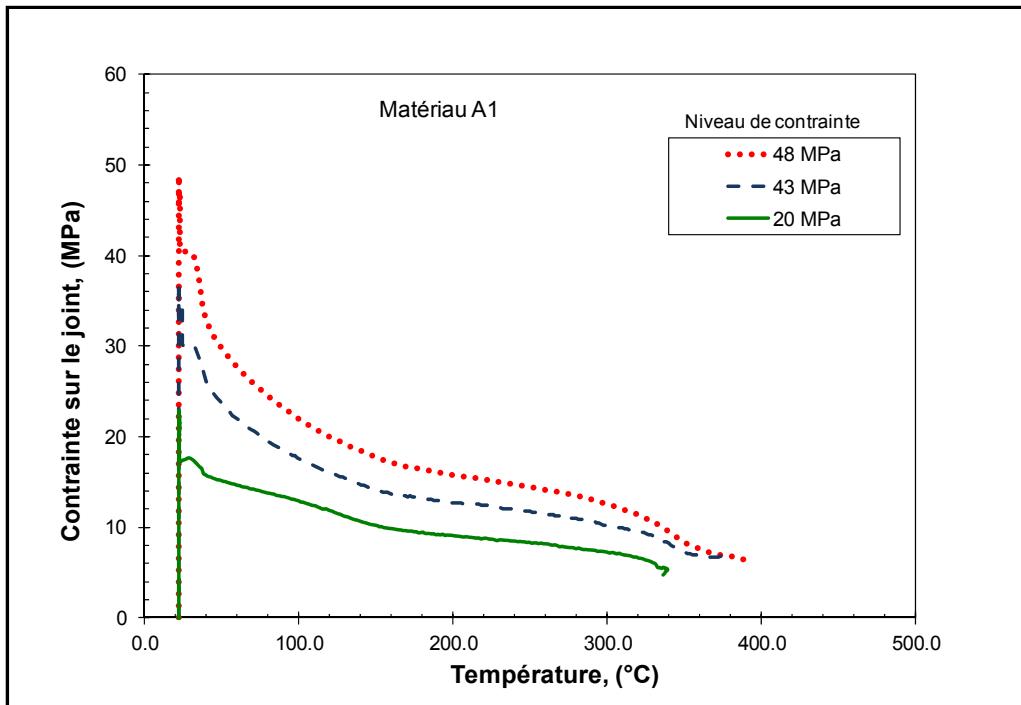


Figure 3.36 Effet de la contrainte initiale sur la relaxation de la contrainte

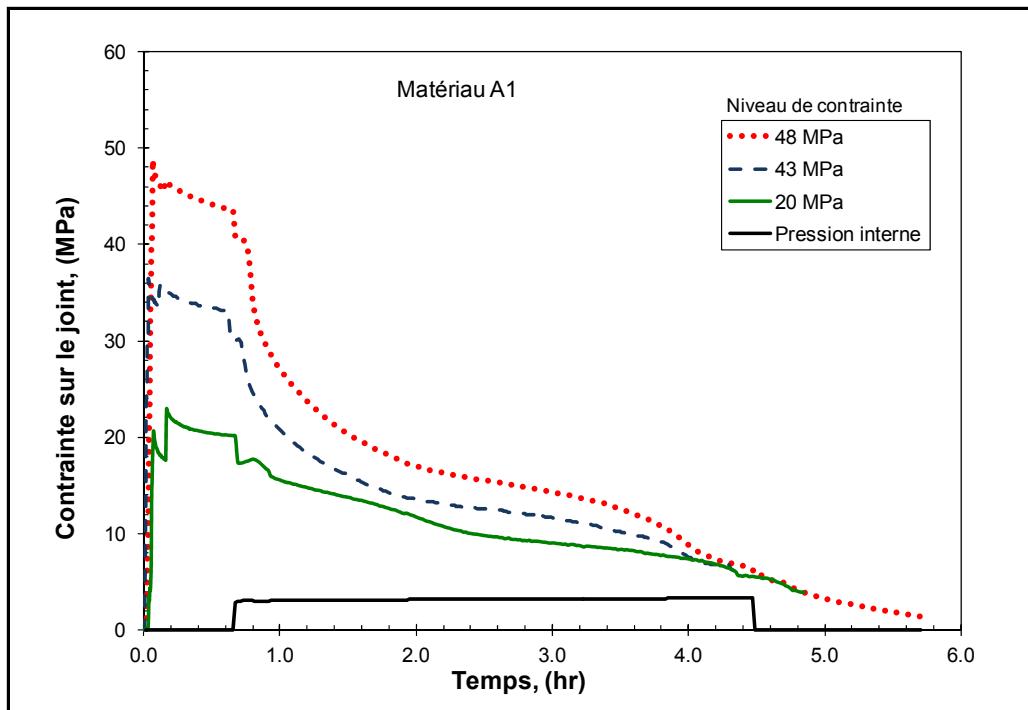


Figure 3.37 Effet de la contrainte initiale sur la chute de contrainte

Tableau 3.5 Récapitulation des caractéristiques mécaniques et thermiques

Caractéristiques du joint		Niveaux de contraintes (MPa)		
		20	34	48
Perte de contrainte (MPa)	Après 30 min	2.7	3	3
	Fin du test	14	27	38
Perte de charge dans les boulons (KN)	Après 30 min	0.08	0.3	0.4
	Fin du test	23	43	61
Taux de relaxation (%)		71	81	84
T°bo (°C)		332	374	389
Sgbo (MPa)		6	7	6
T°R (°C)		150	180	310
		10	13	12

Les résultats obtenus dans cette partie indiquent l'effet de la contrainte initiale appliquée sur le joint. Les valeurs de la perte de la contrainte ou de la relaxation dans le joint, telles que montrées dans le tableau 3.5, confirment que plus le niveau de contrainte initiale appliquée sur le joint est élevé, plus la perte de contrainte sur le joint est importante.

Les caractéristiques mécaniques et thermiques déduites des courbes des figures 3.36 et 3.37 pour les trois niveaux de contraintes ont été calculées en faisant appel aux équations 3.2, 3.5, 3.6 et 3.7. Les valeurs des résultats recueillis sont présentées dans le tableau 3.5.

L'analyse de la courbe de la figure 3.38 nous renseigne sur la relation entre la charge dans les boulons et l'écrasement du joint. Cette relation est linéaire et la pente de la droite représente la rigidité axiale du montage, incluant les brides et les boulons. Cette valeur de rigidité est de 33 095 MPa et représente la rigidité d'un assemblage de brides du type à emmancher et à souder à face surélevée NPS4 classe 150. Il est à noter qu'un ensemble de même grandeur, mais de type à collerette (« welding neck ») est plus rigide et donc relaxe davantage pour les mêmes conditions de fonctionnement.

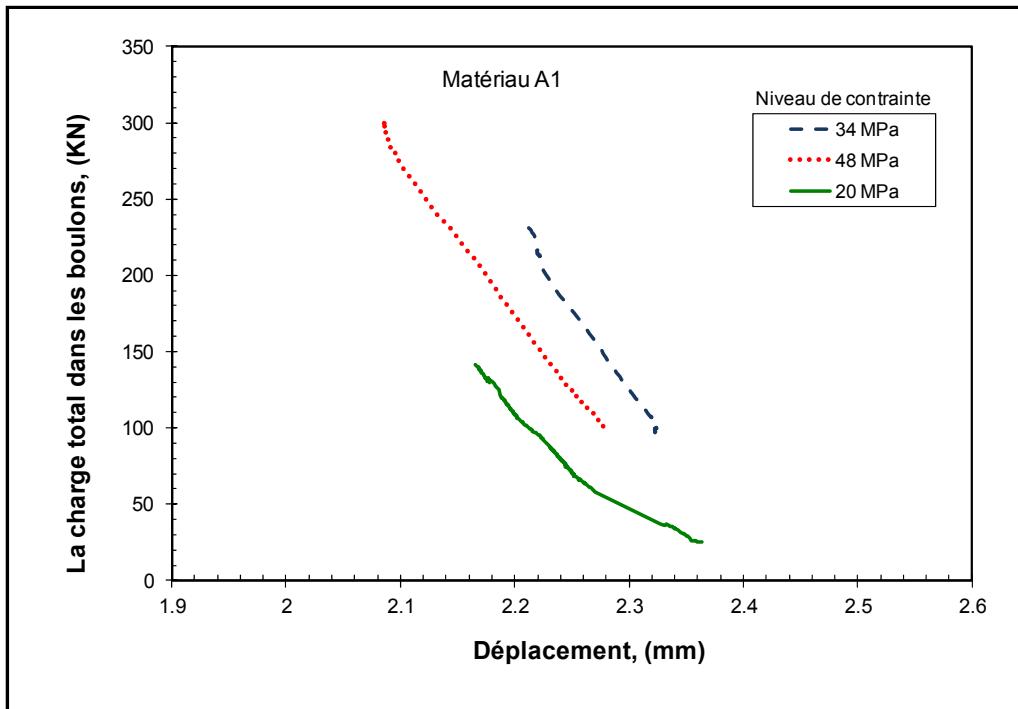


Figure 3.38 Relation entre la charge dans les boulons et l'écrasement du joint

3.3.1.2 Effet du nombre de cycles de chauffage-refroidissement

Les figures 3.39 présentent les résultats du test avec 20 cycles de chauffage et de refroidissement, qui montrent la déformation cumulée du joint appartenant à la famille du matériau A1 ayant une épaisseur de 1,6 mm. L'analyse de la courbe du fluage montre que la déformation due au fluage diminue au cours du temps.

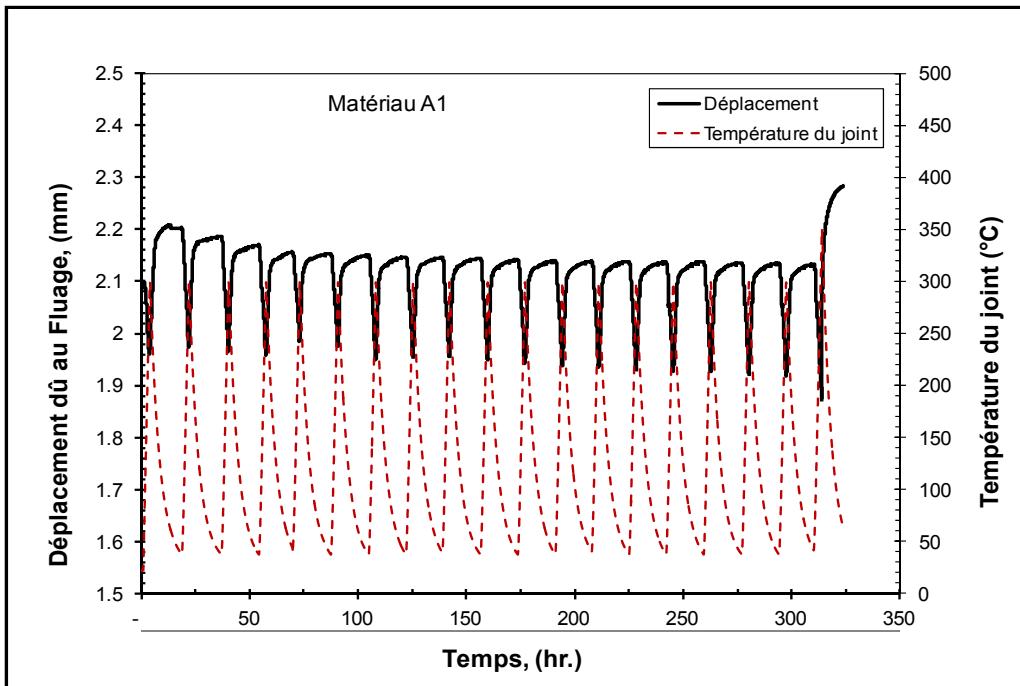


Figure 3.39 Effet du nombre de cycles de chauffage sur la déformation cumulée : Effet de Rochet

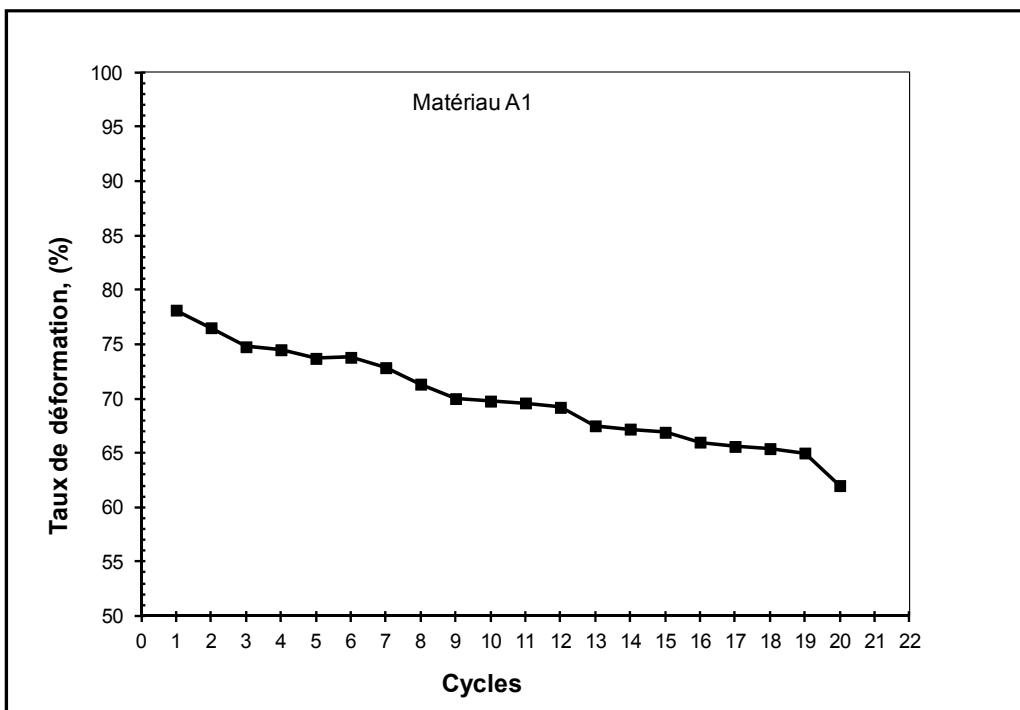


Figure 3.40 Variation du taux de déformation cumulée au cours des 20 cycles

La figure 3.40 illustre l'évolution de la déformation cumulée au cours de 20 cycles de chauffage et refroidissement. Il y apparaît que la déformation continue à diminuer jusqu'au dernier cycle. Or, dans l'avant-projet de norme de la procédure HOBT (ASTM, F03-HOBT), seulement trois cycles de chauffage-refroidissement sont suggérés. Donc il apparaît clairement qu'une étude avec plusieurs types de joints à base de PTFE doit être menée pour déterminer l'influence du nombre de cycles de chauffage-refroidissement sur leur température limite en service.

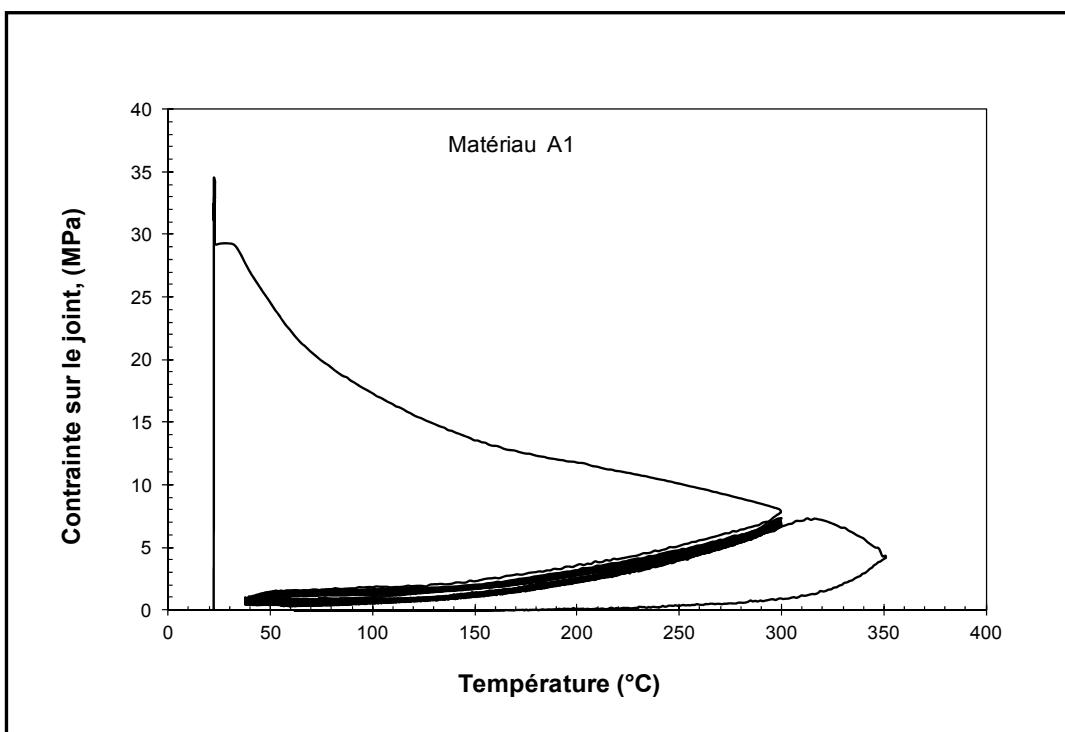


Figure 3.41 Effet des sur l'éclatement du joint

Les figures 3.42 et 5.43 montrent respectivement l'effet des cycles de chauffage et de refroidissement sur la contrainte exercée sur le joint et sur la charge dans les boulons. Selon les courbes, une relaxation additionnelle semble se produire après les premiers cycles, avant de se stabiliser; ce qui est en accord avec l'écrasement cumulé du joint, tel que montré dans les figures 3.39 et 3.40.

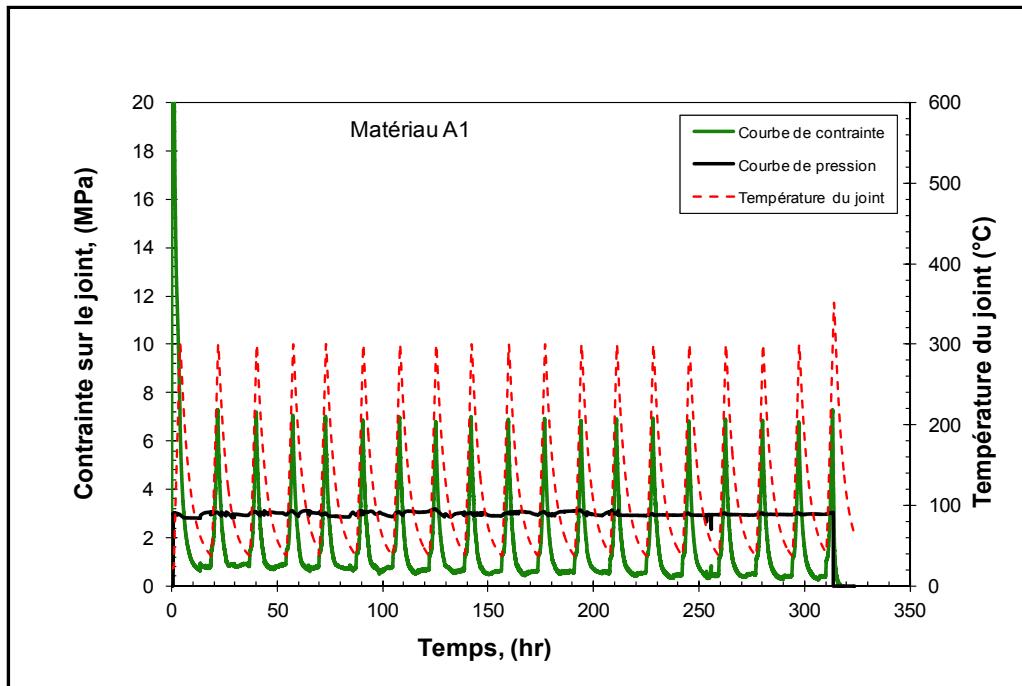


Figure 3.42 L'effet du cycle sur la chute de contrainte aux différentes étapes du test

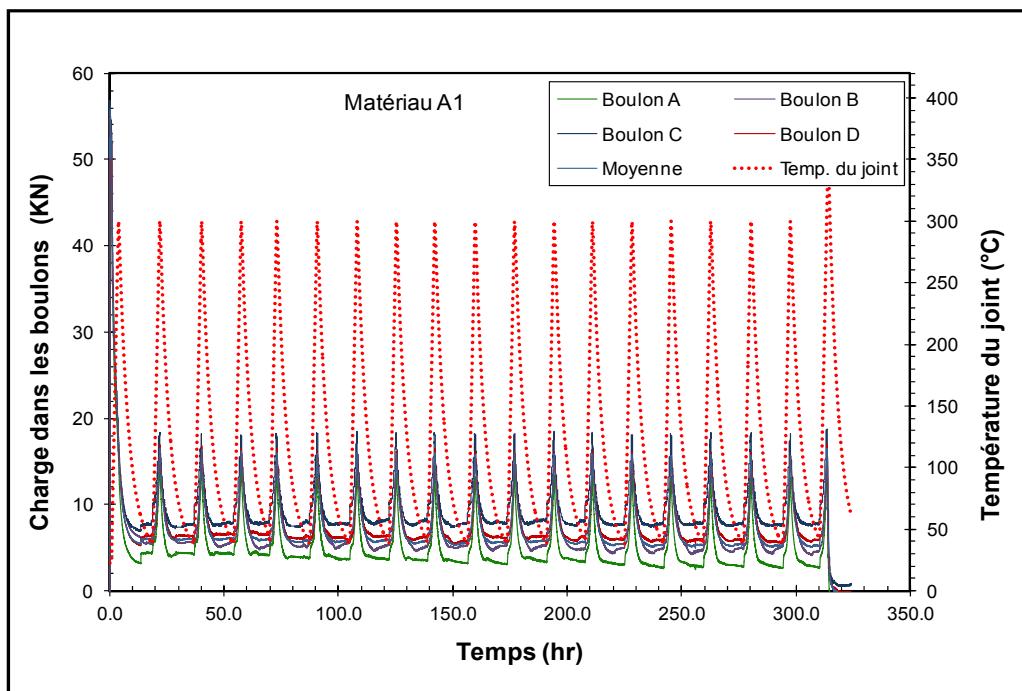


Figure 3.43 L'influence des cycles sur la perte de charge dans les boulons

L'analyse de la courbe présentée à la figure 3.44 démontre que la pente de la courbe charge dans les boulons-déplacement qui présentent la rigidité de la bride reste constante pour les vingt cycles.

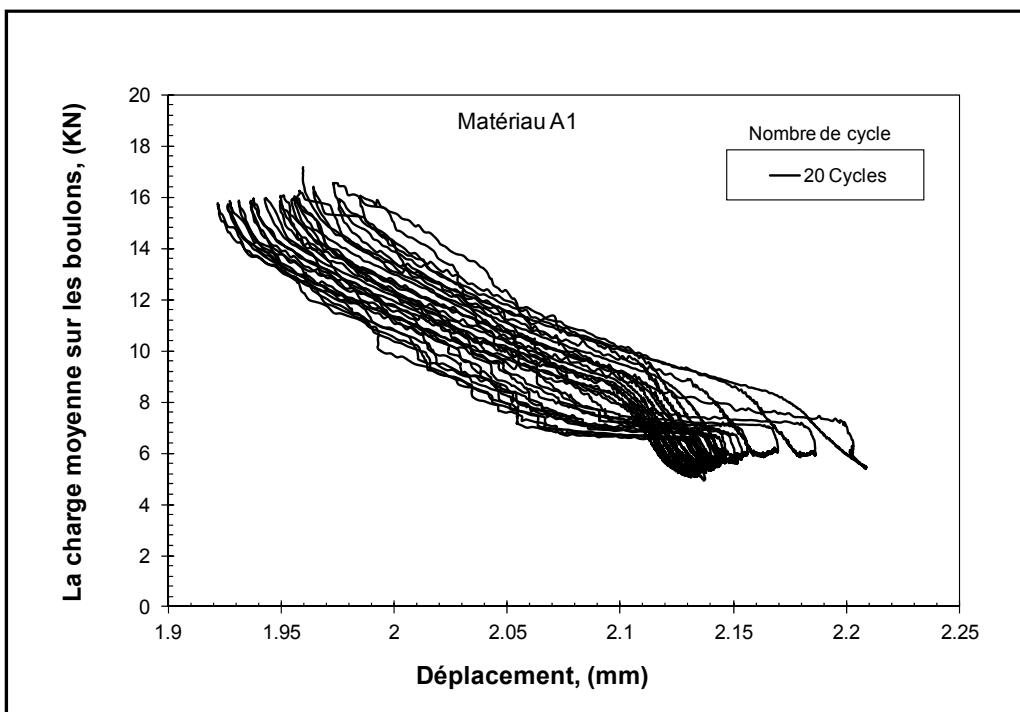


Figure 3.44 La variation de la rigidité au cours des 20 cycles

3.3.1.3 L'effet de la pression interne

La pression interne est l'un des facteurs qui influencent la contrainte et la température de réserve, la relaxation. Les essais réalisés sur l'influence de la pression interne sur les caractéristiques du joint A1 avec une épaisseur de 1.5875 mm sont illustrés par les figures de 3.45 à 3.48.

L'augmentation de la pression interne du fluide pressurisé entraîne la diminution de tous les paramètres liés à la performance des joints, tels que le taux de compressibilité, le taux de

fluage et la relaxation, ainsi que le taux de déformation cumulée, ce qui entraîne par la suite la dégradation du joint.

Les paramètres calculés sous l'effet de la pression interne sont récapitulés au tableau 3.6.

Tableau 3.6 Caractéristiques du joint sous l'effet de la pression interne

Caractéristiques du joint	Pression interne (MPa)			
	0	3	7	
Épaisseur du joint (mm)	$E_p(i)$	3,1	3,2	3,1
	$E_p(c)$	0,685	0,663	0,963
	$E_p(f)$	0,475	0,432	0,778
Taux de compressibilité (%)	78	76,75	69,18	
Taux de fluage (%)	6,7	5,6	3,76	
Taux de défor. cumulée (%)	85	86,4	75,11	

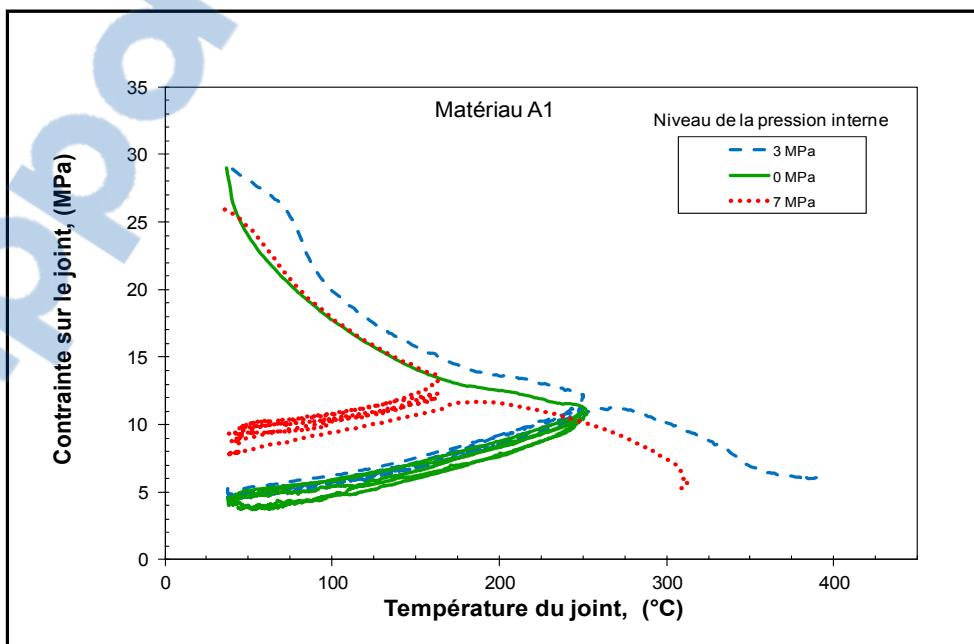


Figure 3.45 La température et la contrainte de réserve sous l'effet de la pression

interne

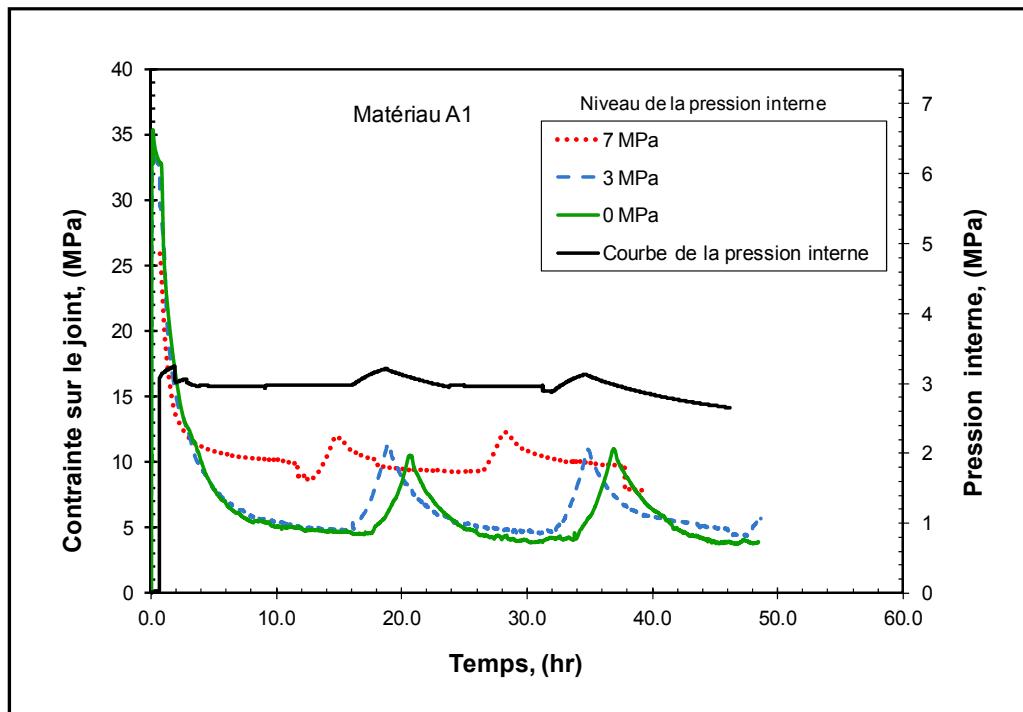


Figure 3.46 Effet de la pression sur la chute de contrainte aux différentes étapes du test

Tableau 3.7 Caractéristiques du joint sous l'effet de la pression interne

Caractéristiques du joint		Pression interne (MPa)		
		0	3	7
Perte de contrainte (MPa)	30 min	-	3,11	6,8
	Final	31,5	27,11	26,70
Perte de charge (KN)	30 min	-	0,365	0,5
	Final	46,4	44	43
Taux de relaxation (%)		89	83,5	77
T°bo (°C)		-	391	310
Sgbo (MPa)		-	6	6,6
T°R (°C)		-	257	192
SgR (MPa)		-	11,5	11,7

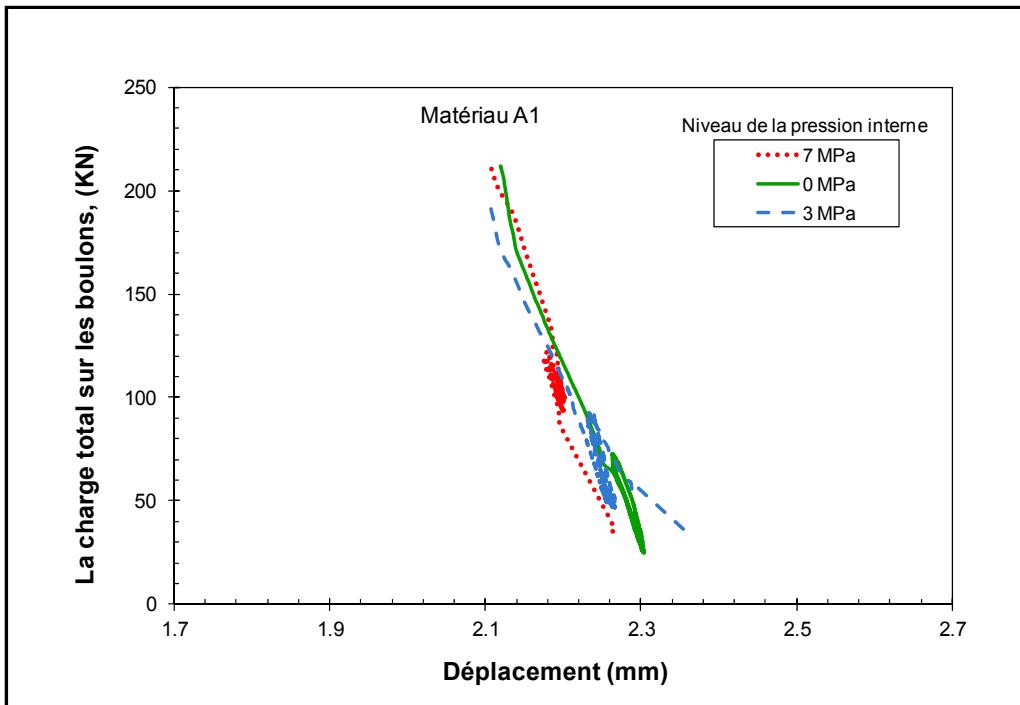


Figure 3.47 Influence de la pression interne sur la rigidité

3.3.1.4 L'effet du maintien de la température

Cette partie présente les résultats à propos de l'effet du maintien de la température sur le fluage-relaxation, la température et la contrainte de réserve, comme présentés aux figures 3.48 à 3.52. La figure 3.48 montre que sous l'effet du maintien de la température, la déformation due au fluage-relaxation est relativement stable durant les 100 heures de maintien. Les sursauts de la courbe sont dus à l'ajustement de la pression interne, qui ne peut être maintenue lors du test à cause des fuites. Une comparaison avec un essai standard de 5 heures est montrée sur la même figure. Contrairement au cas du test du maintien de la température, le test standard montre une déformation qui augmente avec l'élévation de la température, mais qui tend à se stabiliser après deux heures de chauffage.

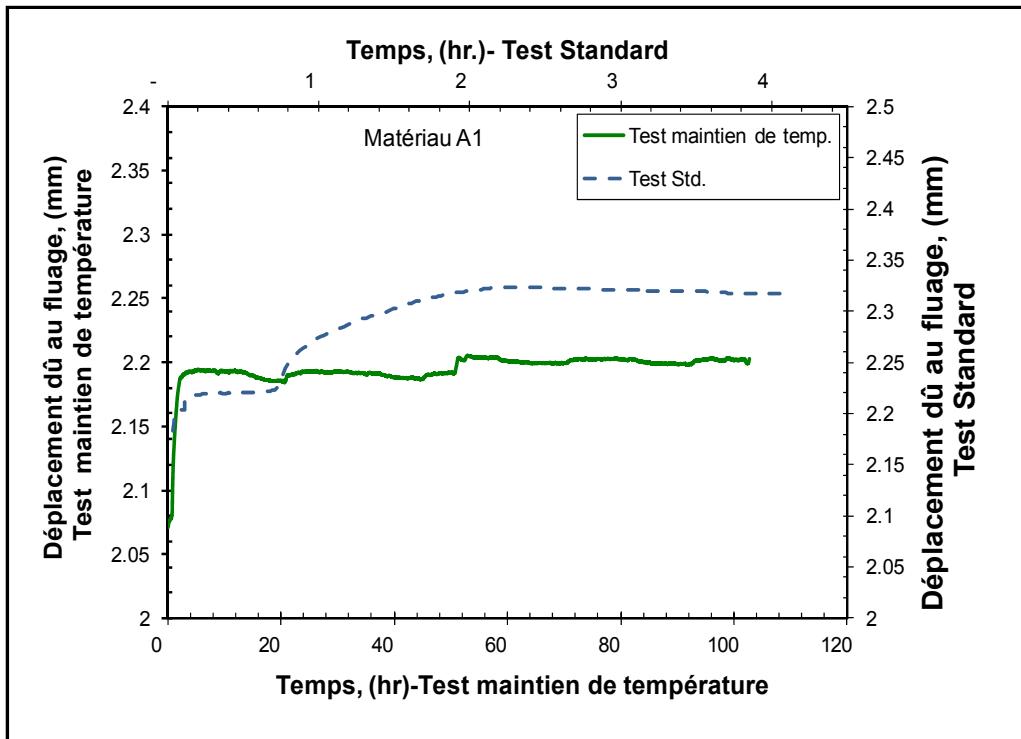


Figure 3.48 Impact du maintien de la température sur la déformation

Les valeurs du taux de déformation durant les différentes étapes de l'essai, citées dans le tableau 5.8, illustrent que le maintien de la température à court terme n'a pas d'effet important sur le taux de fluage.

Tableau 3.8 Caractéristiques du joint selon le type de test

Caractéristiques du joint	Type de test	
	Test Std.	Test a T° Cte.
Épaisseur du joint (in)	E _P (i)	0,123
	E _P (c)	0,0428
	E _P (f)	0,0296
Taux de compressibilité (%)	66,72	65
Taux de fluage (%)	10,3	18,5
Taux de défor. cumulée (%)	77,02	72

L'effet du maintien de la température sur la contrainte exercée sur le joint est illustré à la figure 5.54. Il y apparaît clairement que les courbes des deux essais ont la même allure et se superposent de façon quasi parfaite.

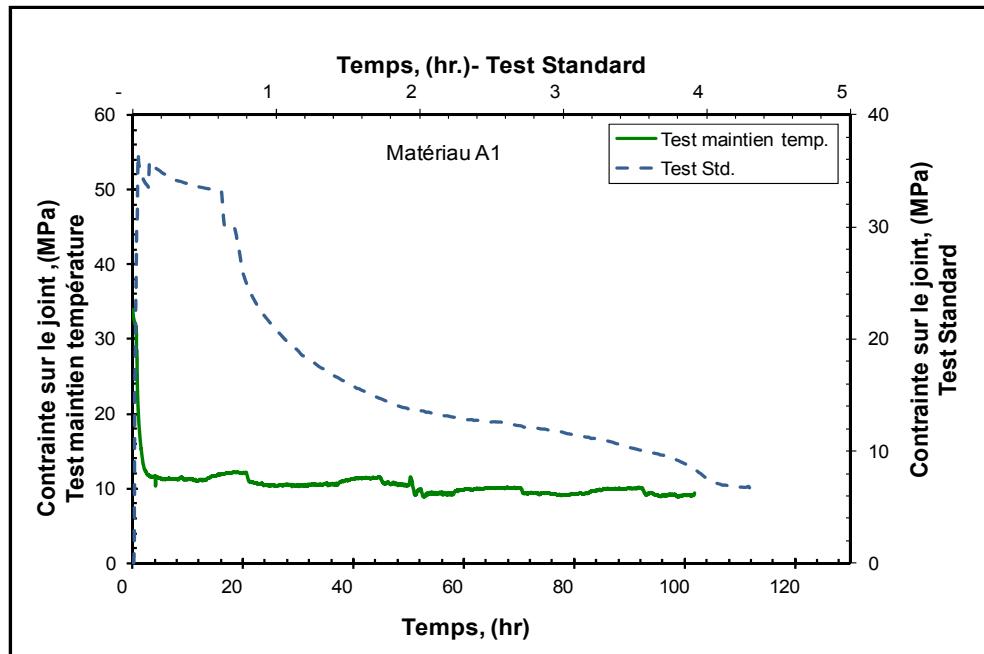


Figure 3.49 Effet du maintien de température sur la chute de contrainte

Les caractéristiques mécaniques et thermiques déduites des courbes représentées par les figures 3.49 et 3.50 pour les deux essais (standard et avec le maintien de la température) sont présentées dans le tableau 3.9.

Tableau 3.9 Tableau récapitulatif des caractéristiques

Caractéristiques du joint		Pression (MPa)	Type de Test	
			Test Std.	Test T° Cte
Perte de contrainte (MPa)	30 min	3	2.97	3.08
	Final	0	26.7	26
Perte de charge (KN)	30min	3	0.28	0.32
	Final	0	43	42
Taux de relaxation (%)			81.36	83
T°bo (°C)			375	360
Sgbo (MPa)			6.33	5.76
T°R (°C)			175	182
SgR (MPa)			13	12

L'analyse des courbes de la figure 3.50 nous renseigne au sujet de l'effet du maintien de la température sur la température et la contrainte de réserve. Il en ressort que le maintien n'a pratiquement pas d'effet sur les caractéristiques d'éclatement du joint.

L'impact du maintien de la température sur la déformation du joint est présenté à la figure 3.51. La pente de la courbe force-écrasement du joint, qui sert à déterminer la rigidité de l'assemblage, semble être identique dans les deux cas.

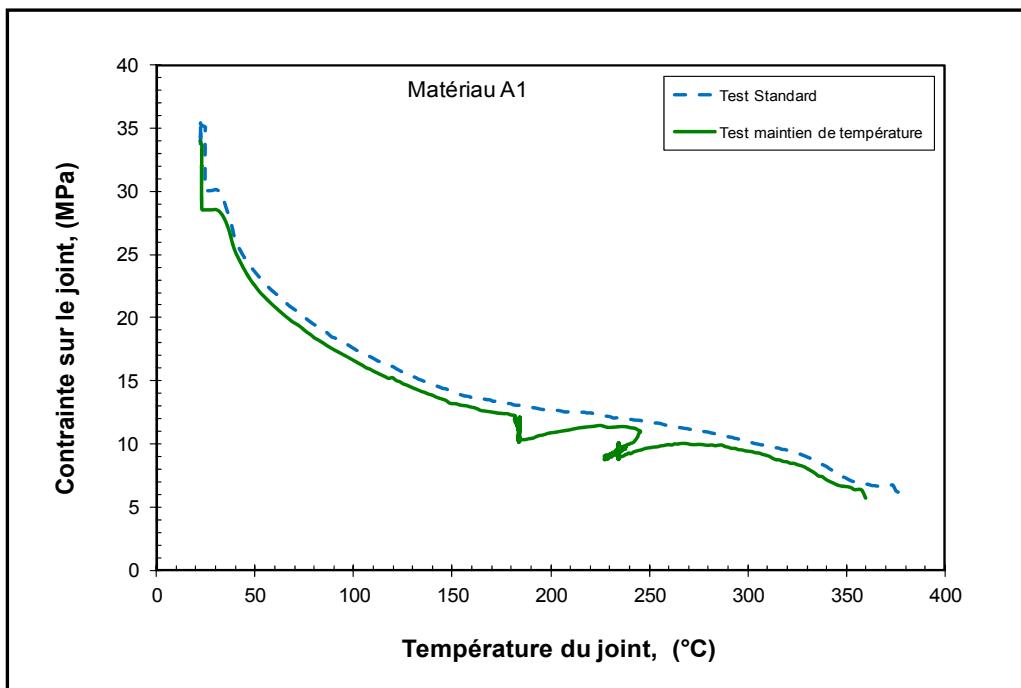


Figure 3.50 La température et la contrainte de réserve sous l'effet du maintien de la température

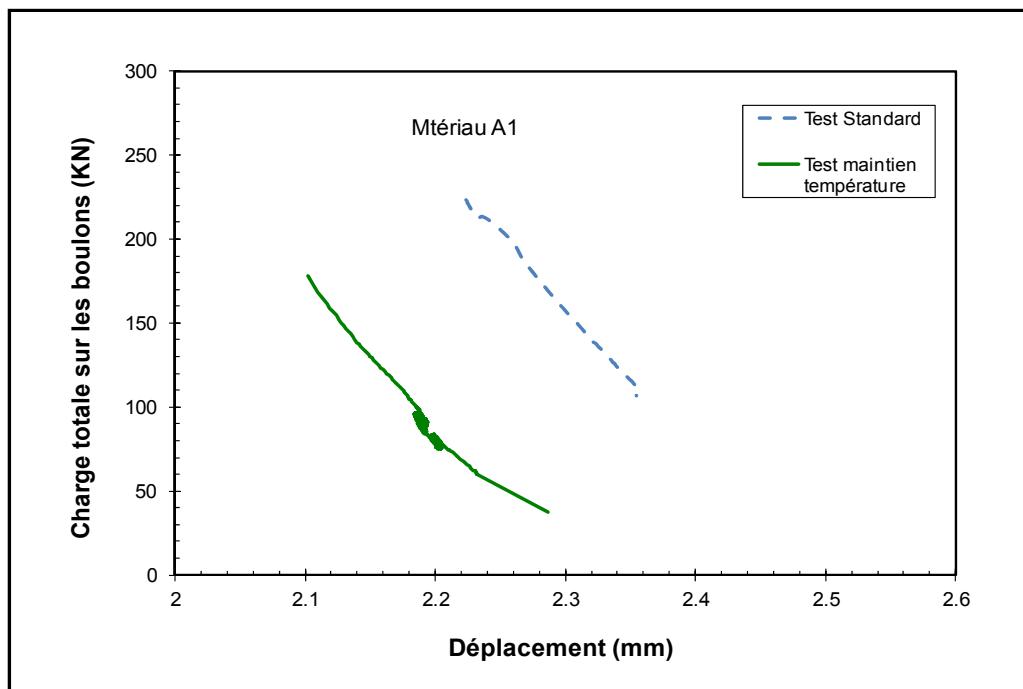


Figure 3.51 L'influence du maintien de la température sur la déformation

3.3.2 Effet du type de joint

Trois catégories de joints à base de téflon ont été testées : joints mous, rigides et métaloplastiques renforcés avec un insert métallique.

Joint métaloplastique

Deux types de joints métaloplastiques renforcés avec un insert métallique ont été testés durant cette partie de l'étude; ces joints sont fabriqués à partir d'une feuille métallique ondulée recouverte d'une couche en téflon expansé, tel que montré à la figure 3.53. Le joint référencé F est formé d'un insert de largeur plus petite avec des ondulations plus courtes que celles du joint A3.

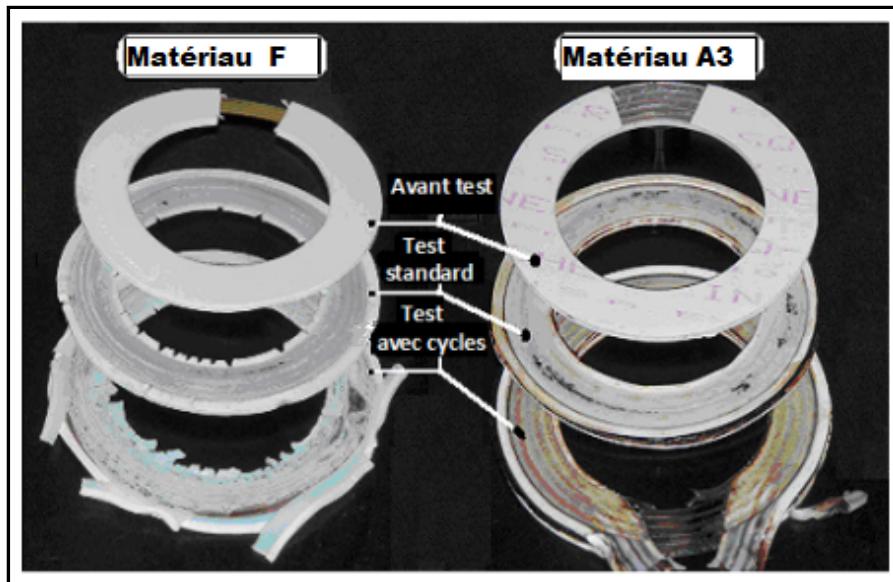


Figure 3.52 Les deux types de joints métalloplastiques testés

Joint mous

La figure ci-dessous illustre la microstructure d'un joint mou testé. Elle révèle que ce matériau est exempt de chargement du type fibre.

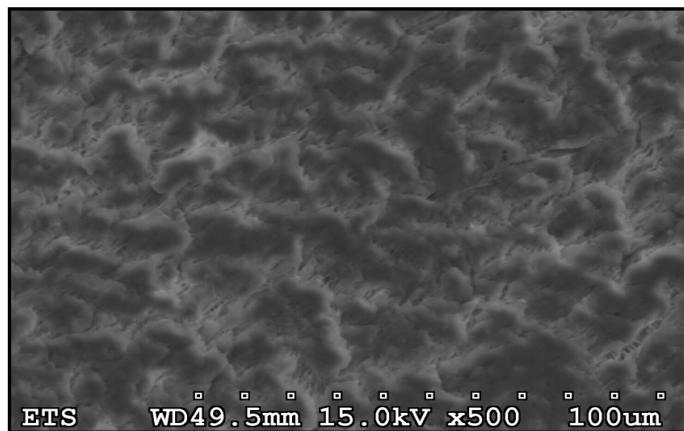


Figure 3.53 Microstructure d'un joint mou

La photographie des différents joints mous avant et après les tests est représentée sur la figure 3.54. Les tests ont été menés dans les mêmes conditions de contrainte et de température. On y voit nettement l'éclatement des différents joints testés.

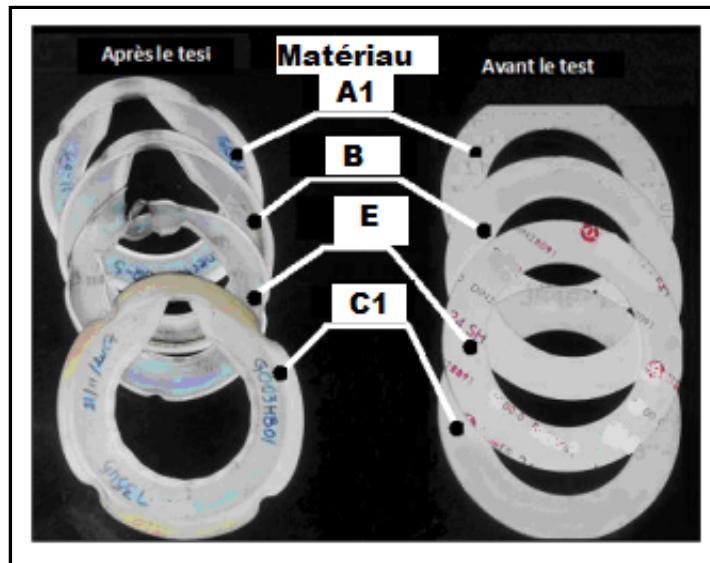


Figure 3.54 Vue des joints mous avant et après les tests

Joint rigides

La figure ci-dessus illustre la microstructure d'un joint rigide testé, prise par microscopie électronique à balayage. La photo révèle la présence de renforts dispersés au sein de la matrice de PTFE.

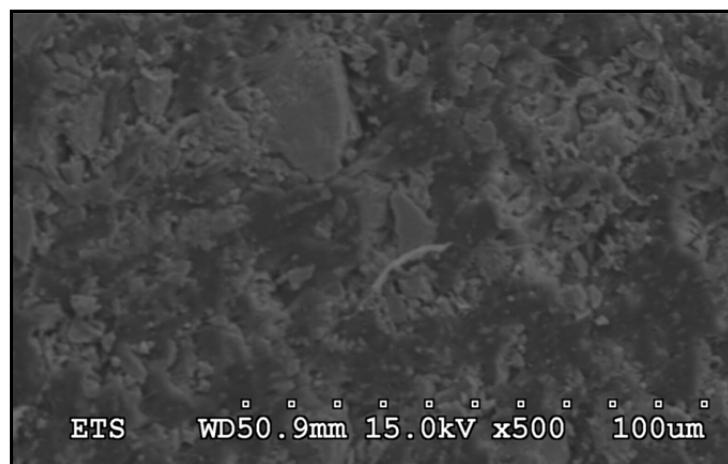


Figure 3.55 Microstructure d'un joint rigide

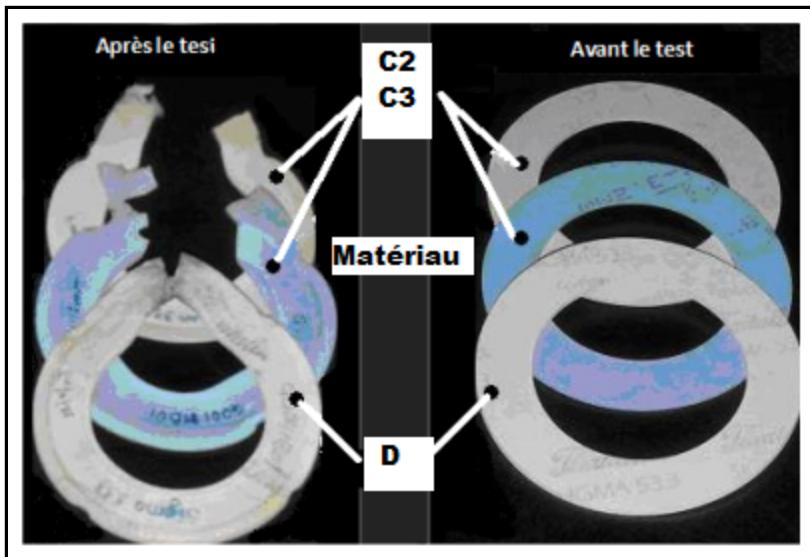


Figure 3.56 Les trois types de joints rigides testés

3.3.2.1 Joint métaloplastique

Les figures 3.58 à 3.62 présentent les résultats des tests qui montrent l'effet du type de matériau sur les caractéristiques mécaniques du joint. L'analyse de ces courbes indique que le type de joint n'a aucun impact sur l'évolution du fluage. Cependant, une différence faible, mais non négligeable est observée concernant la déformation cumulée au cours des trois cycles. Les valeurs recueillies à partir des graphiques sont regroupées dans le

tableau 3.11.

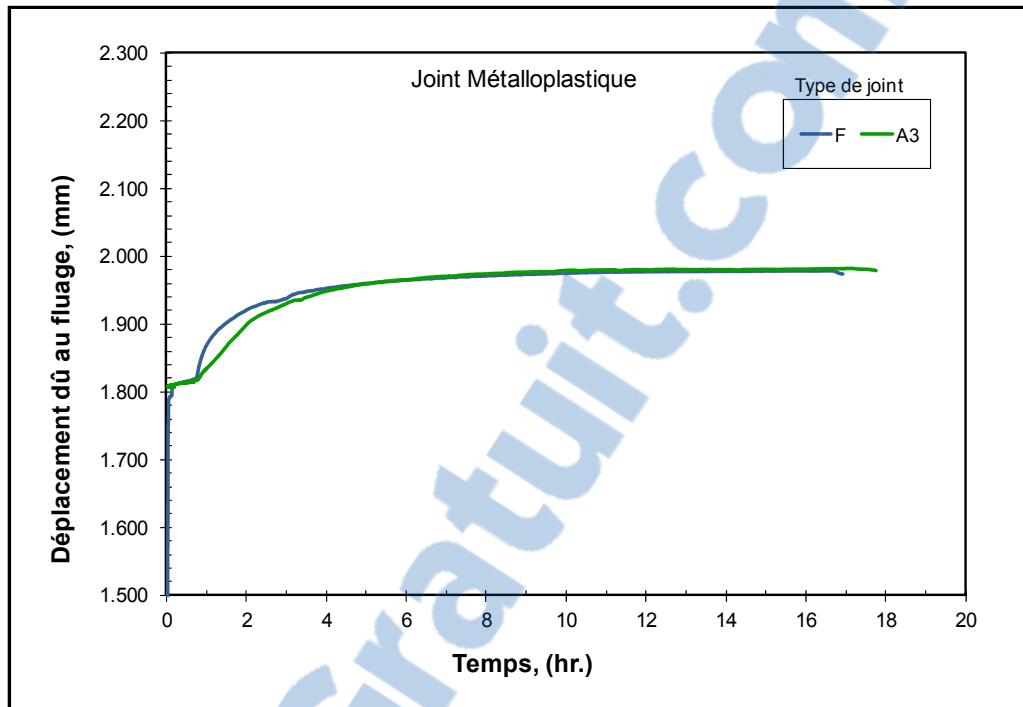


Figure 3.57 Impact du type de joint sur l'évolution du fluage

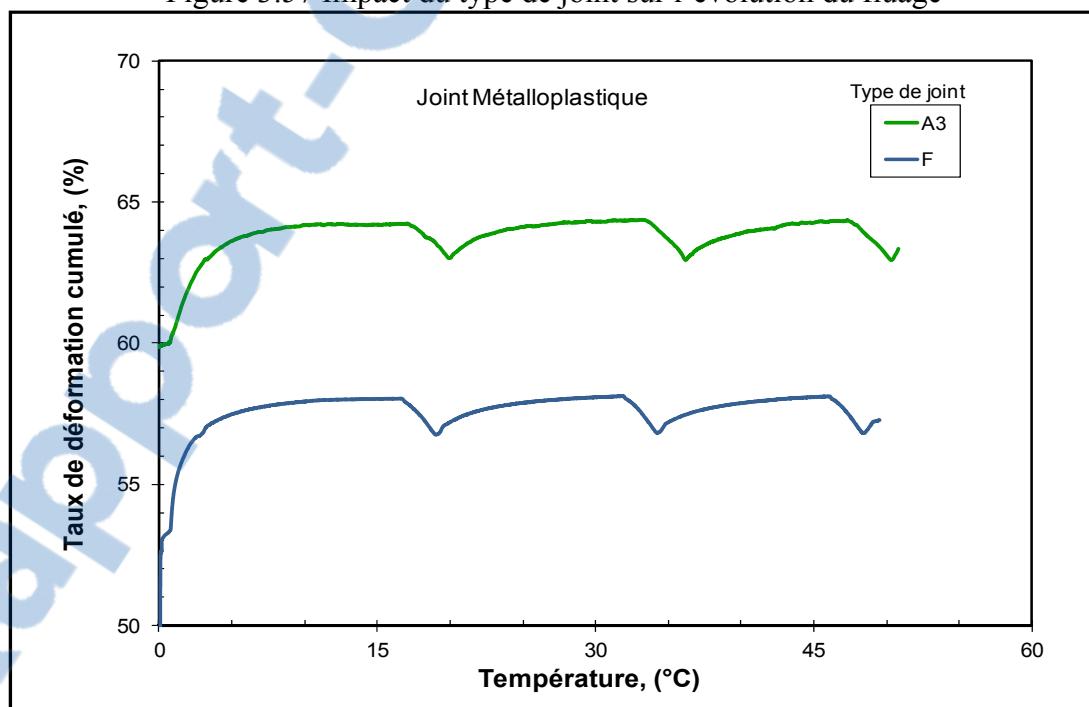


Figure 3.58 L'effet du type de joint sur la déformation cumulée au cours des trois cycles

Tableau 3.10 Valeurs récapitulatives des caractéristiques mécaniques et thermiques

Caractéristiques du joint	Matériau	
	A3	F
Épaisseur du joint (mm)	$E_p(i)$	3,0
	$E_p(c)$	1,2
	$E_p(f)$	1,0
Taux de compressibilité (%)	60	52,44
Taux de fluage (%)	4,36	5,6
Taux de défor. cumulée (%)	66,63	57,36

Selon la courbe illustrée par la figure 3.57, on peut noter que la résistance au fluage-relaxation du matériau F est moins importante que celle de A3. Cela est dû à la forme de l'insert métallique. En effet, les ondulations tendent à confiner plus de téflon dans les espaces créés entre la surface de la bride et l'insert métallique; ce qui empêche le téflon, devenant mou à cause de la température, de migrer radialement vers l'intérieur et l'extérieur du joint. Il en résulte une perte d'épaisseur.

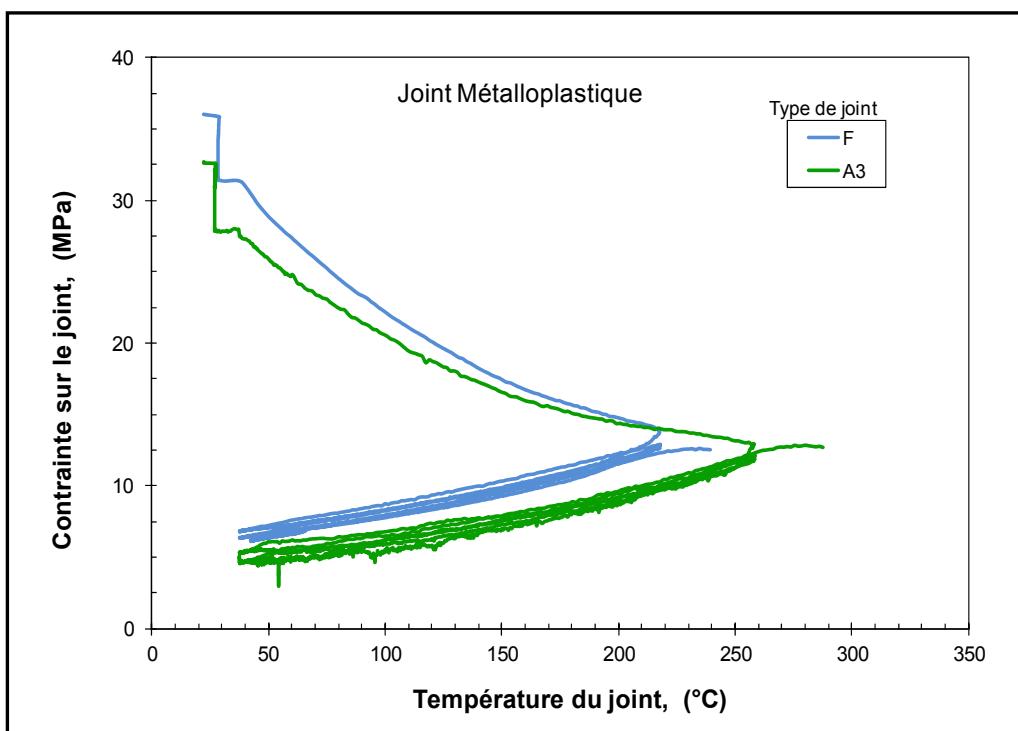


Figure 3.59 Détermination de la température et de la contrainte de réserve

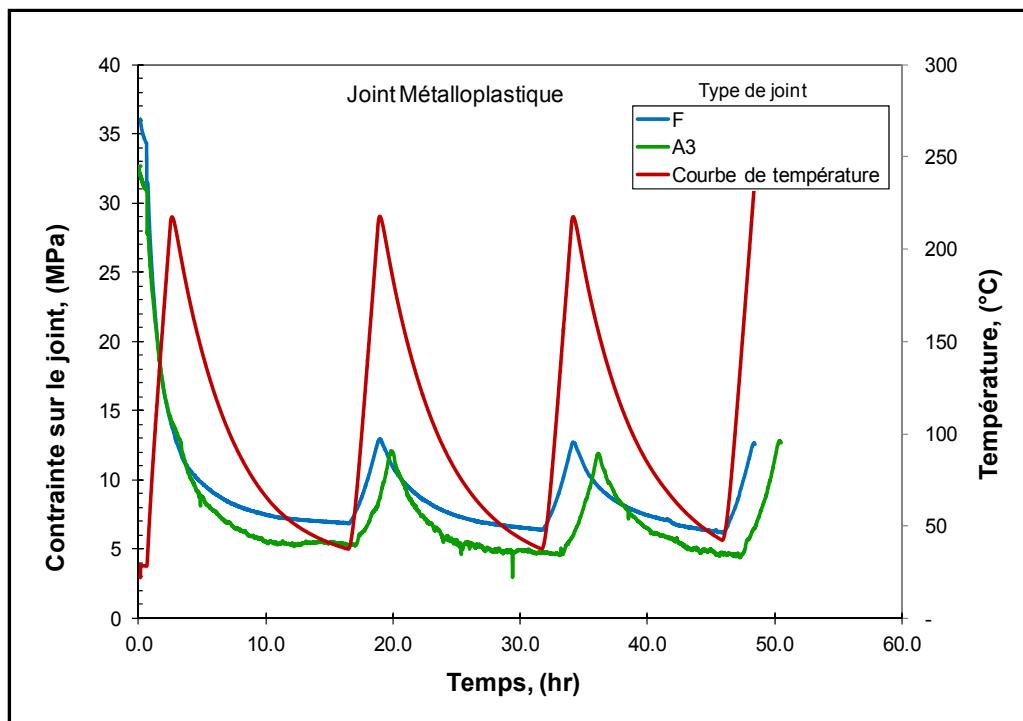


Figure 3.60 L'effet de type de matériau sur la chute de contrainte aux différentes étapes du test

La figure 3.60 montre l'effet du type de matériau sur la contrainte durant les différentes étapes du test. Les deux matériaux A3 et F présentent le même comportement pendant le chauffage. Cependant, un écart de 1.38 MPa est observé au cours du refroidissement. Cet écart est dû à la différence de la forme géométrique des inserts métalliques.

Tableau 3.11 Valeurs récapitulatives des caractéristiques mécaniques et thermiques

Caractéristiques du joint		Pression (MPa)	Matériau	
			A3	F
Perte de contrainte (MPa)	30 min	3	2,96	2,84
	Final	0	30	4
Perte de charge (KN)	30 min	3	0.2	0,16
	Final	0	48,5	46
Taux de relaxation (%)			81,2	78,32
T°bo (°C)			-	392
Sgbo (MPa)			-	3
T°R (°C)			-	199
SgR (MPa)			-	37

Le type de joint semble n'avoir aucun effet sur la rigidité du montage, comme le représente la figure ci-dessous.

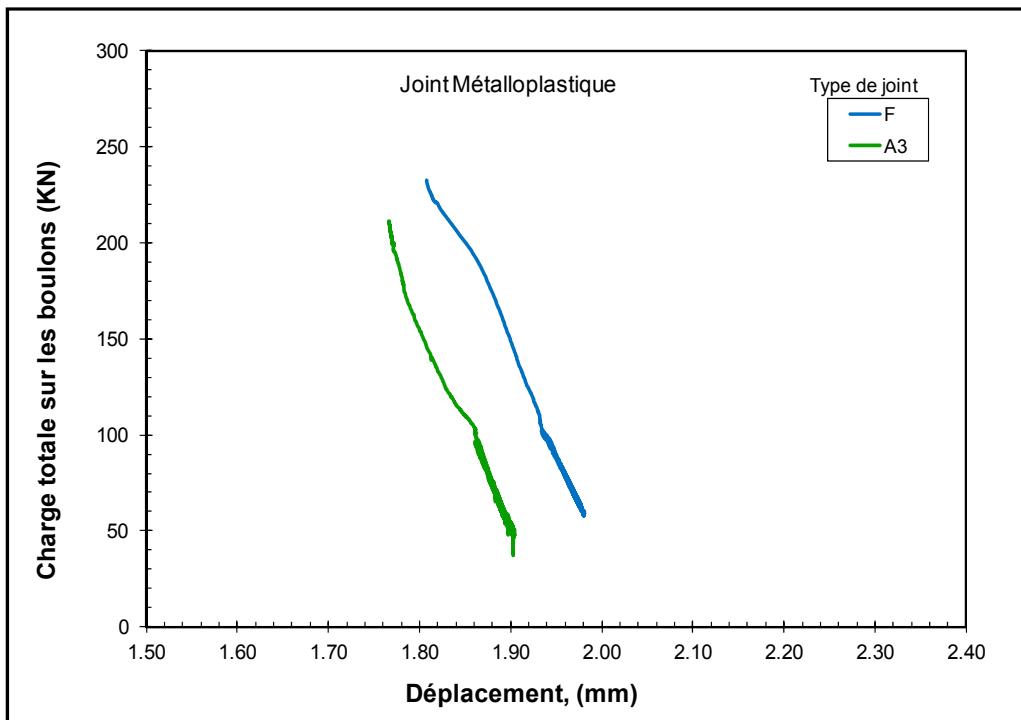


Figure 3.61 Relation force-érassement de joints

3.3.2.2 Joints mous

L'impact du type de matériau sur l'évolution du fluage et la déformation cumulée a été étudié lors du test HOBT avec cycles. Les matériaux A1, B, C1 et E ont été testés dans les mêmes conditions de contrainte initiale, température et pression. La figure 3.62 et 3.63 révèle que les courbes ont pratiquement la même allure. Les déformations dues au fluage des trois matériaux A1, B et C1 sont similaires du point de vue forme et magnitude. Cependant, le matériau E présente une déformation moins importante; ce qui laisse croire a priori que le matériau devrait être classé comme étant rigide.

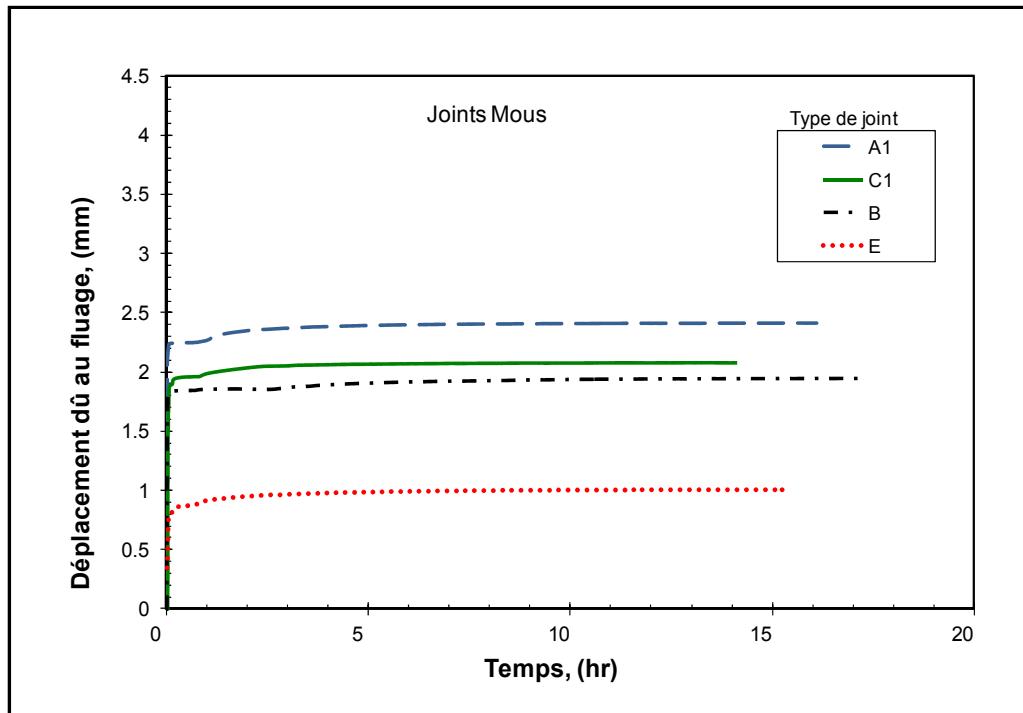


Figure 3.62 Impact du type de matériau sur l'évolution du fluage du joint lors du test HOBT sans cycle de chauffage-refroidissement

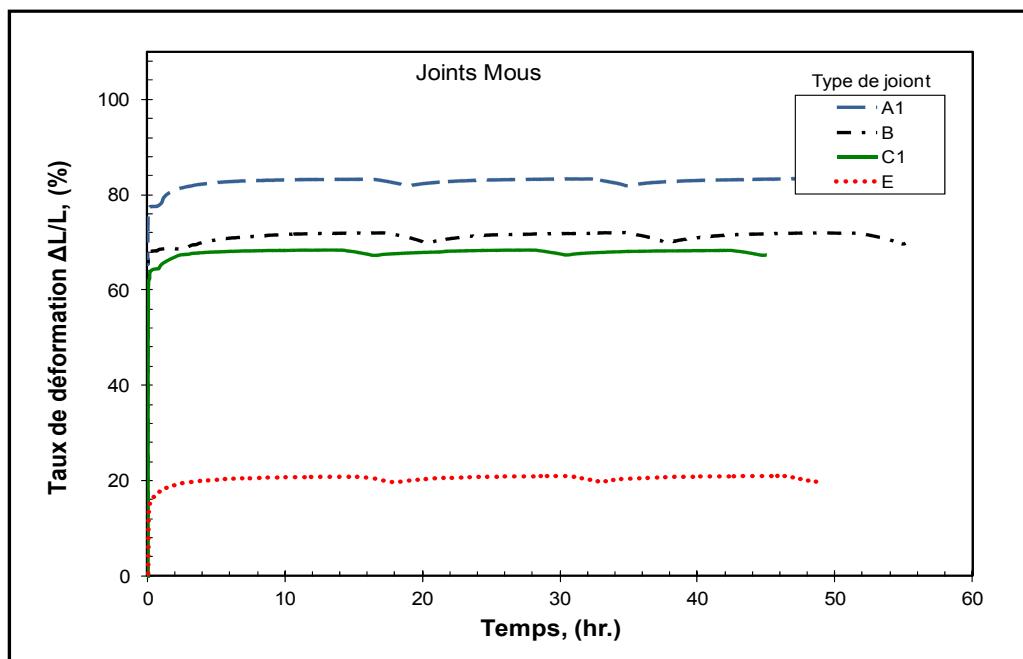


Figure 3.63 Effet du matériau sur le taux de déformation du joint

Selon les résultats présentés dans le tableau 3.13, les valeurs du taux de compressibilité pour les trois matériaux (A1, B et C1) semblent proches, mais beaucoup plus élevées par rapport à celles du matériau E.

Tableau 3.12 Déformation des quatre types de joints mous

Caractéristiques du joint	Types de matériaux				
	A1	B	C1	E	
Épaisseur du joint (mm)	$E_p(i)$	2,89	2,99	2,99	3,25
	$E_p(c)$	0,66	1,20	1,20	2,87
	$E_p(f)$	0,43	0,69	0,69	2,53
Taux de compressibilité (%)	77,2	69,2	60	11	
Taux de fluage (%)	6,14	3,7	5,1	10	
Taux de défor. cumulée (%)	85	81	77	22	

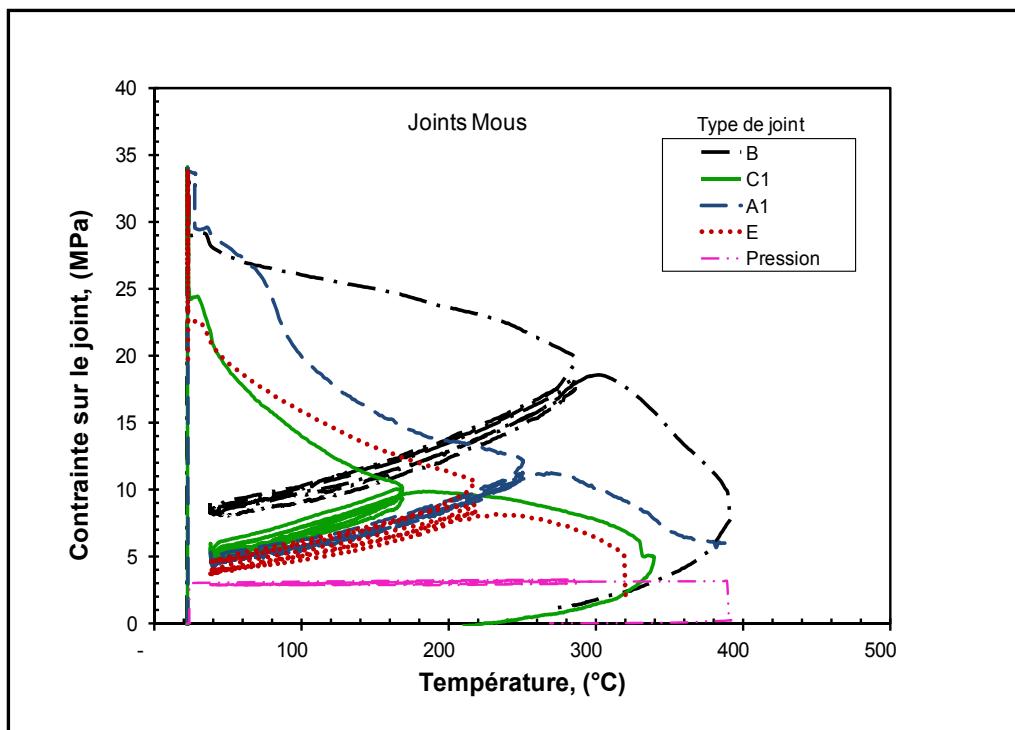


Figure 3.64 La température et la contrainte de réserve sous l'effet du matériau du joint

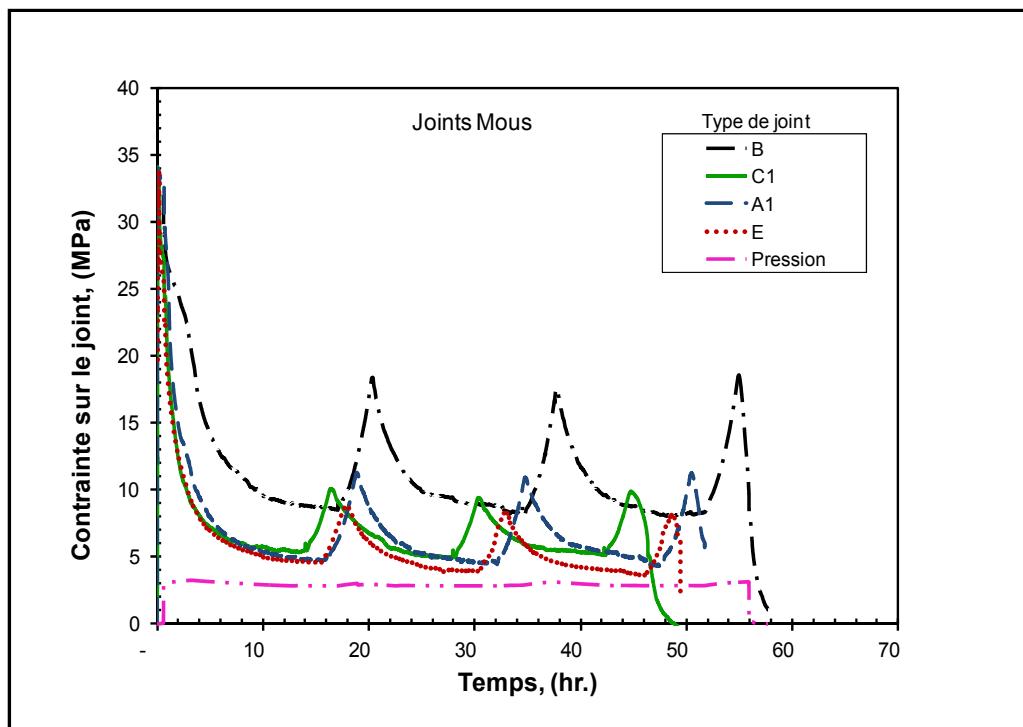


Figure 3.65 L'effet du type de matériau sur la chute de contrainte

Tableau 3.13 Valeurs récapitulatives des caractéristiques mécaniques et thermiques

Caractéristiques du joint		Pression (MPa)	Type de joint			
			C1	B	A1	E
Perte de contrainte (MPa)	30 min	3	0,72	3,11	3,11	3,1
	Final	0	20	23,6	27,11	23,5
Perte de charge (KN)	30 min	3	0,013	0,22	0,36	0,13
	Final	0	35,5	37,8	43,8	38
Taux de relaxation (%)			75	66	83	77
T°bo (°C)		332	390	391	320	
Sgbo (MPa)		5	8	5	2	
T°R (°C)		160	310	260	122	
SgR (MPa)		10	18	12	15	

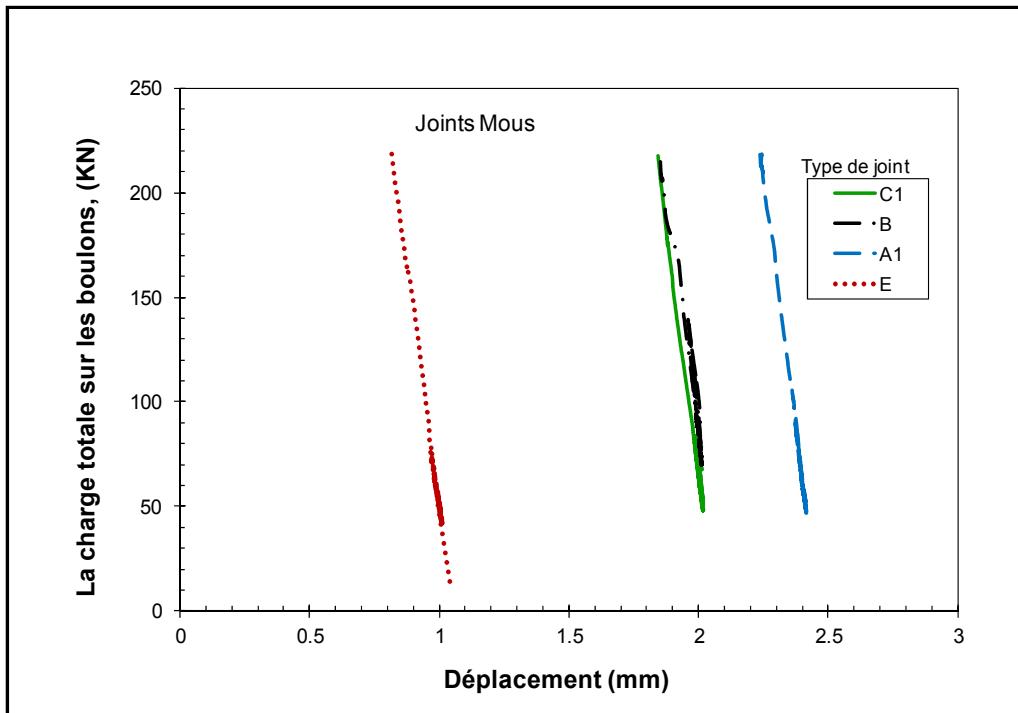


Figure 3.66 Relation force-écrasement des joints

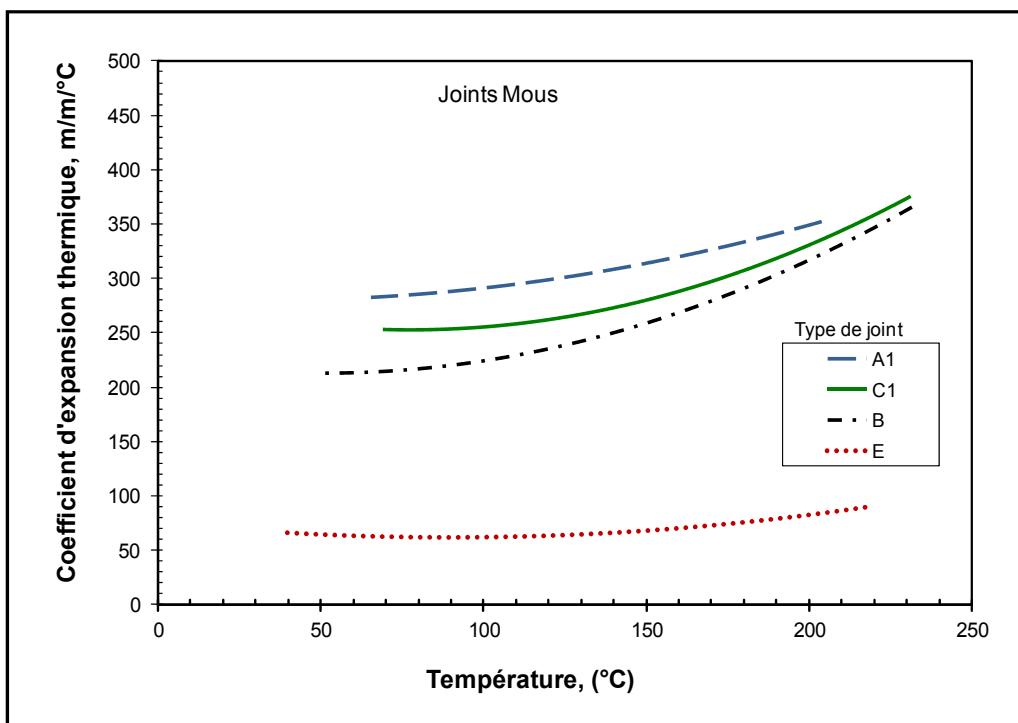


Figure 3.67 Coefficient d'expansion thermique des quatre types de joints mous en fonction de la température

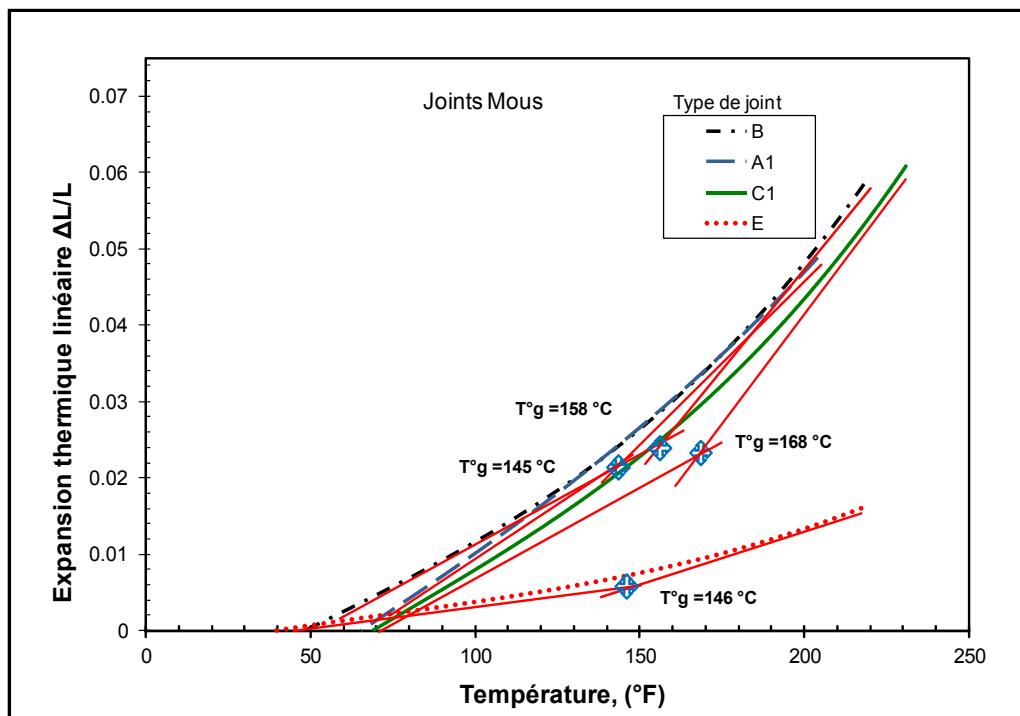


Figure 3.68 Température de transition vitreuse des quatre types de joints

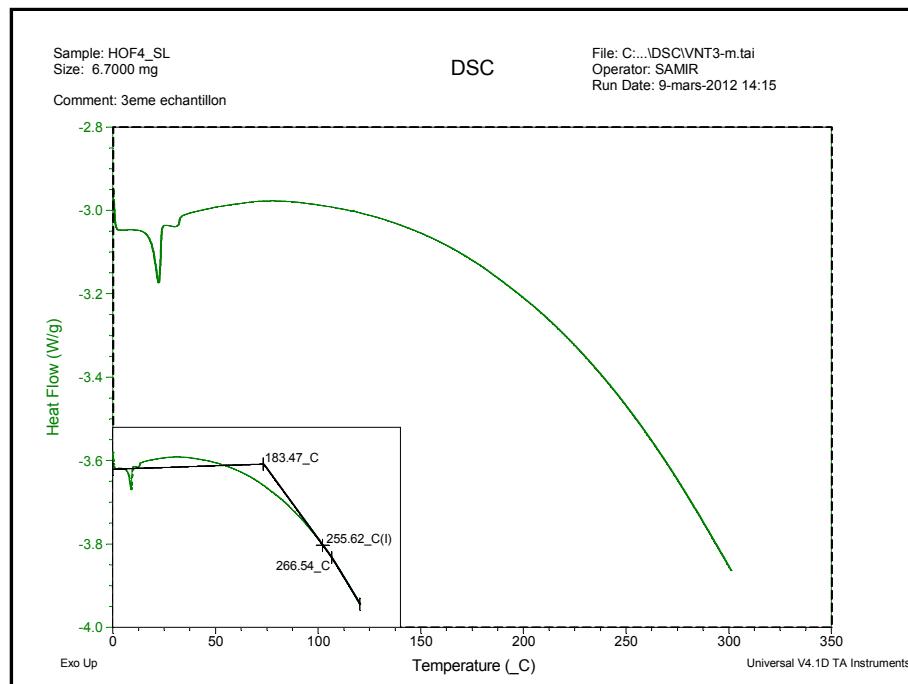


Figure 3.69 La température de transition vitreuse par DSC

3.3.2.3 Joints rigides

À travers les tests réalisés, sur la plage de température étudiée, nous pouvons constater que l'évolution des propriétés thermiques et mécaniques a bien été mise en évidence pour les différents types de matériaux avec lesquels le joint est fabriqué.

Les figures 3.70 et 3.71 montrent respectivement l'effet du type de joint sur le taux de fluage et la déformation cumulée. Il en ressort qu'il n'y a aucune cumulation de déformation pour les trois types de joints testés. Toutefois, le joint C3 présente une résistance moins importante que les deux autres joints (C2 et D).

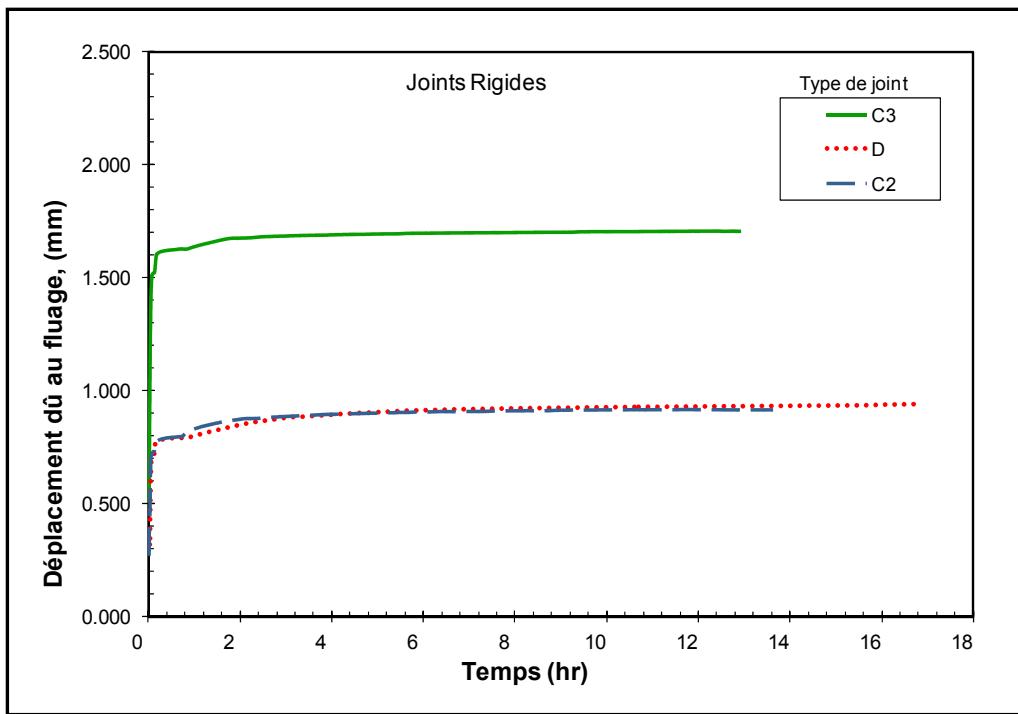


Figure 3.70 Impact des types de joints rigides sur l'évolution du fluage

La relaxation de la contrainte jusqu'à l'éclatement du joint en fonction de la température est représentée par la figure 3.72. Pour analyser plus précisément l'impact du type de matériau avec lequel le joint est fabriqué sur sa résistance à l'éclatement, nous avons déterminé la température et la contrainte de réserve pour les trois types de matériaux. Les résultats

illustrent qu'il y a une différence significative de 38 °C entre la température de réserve de C3 et les deux autres types (C2 et D).

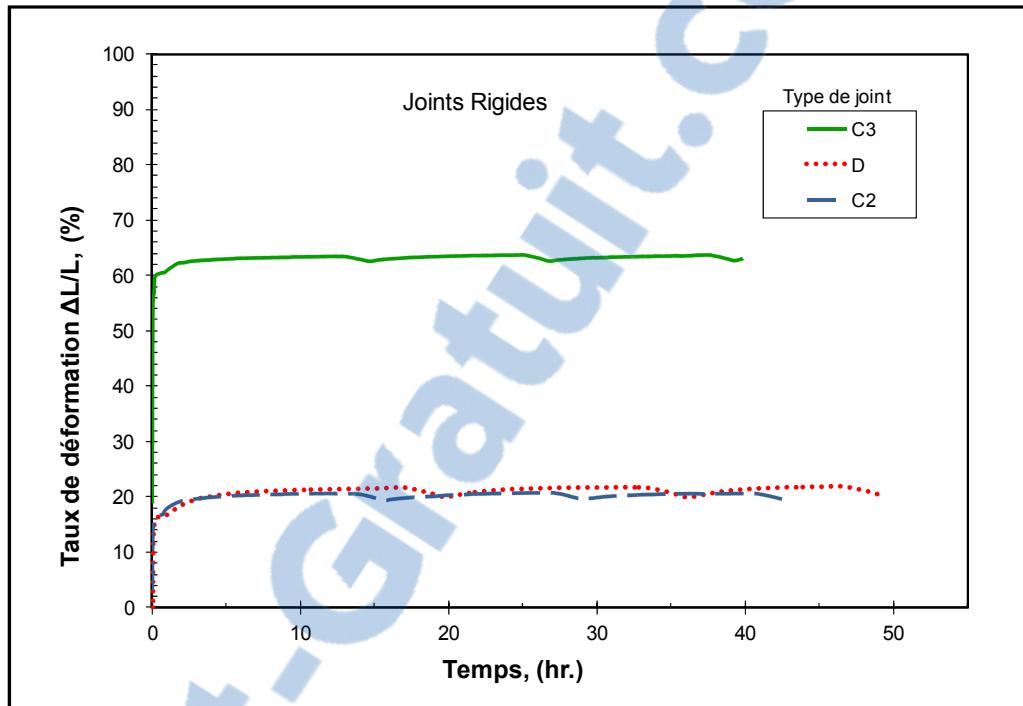


Figure 3.71 L'effet des types de joints rigides sur la déformation cumulée

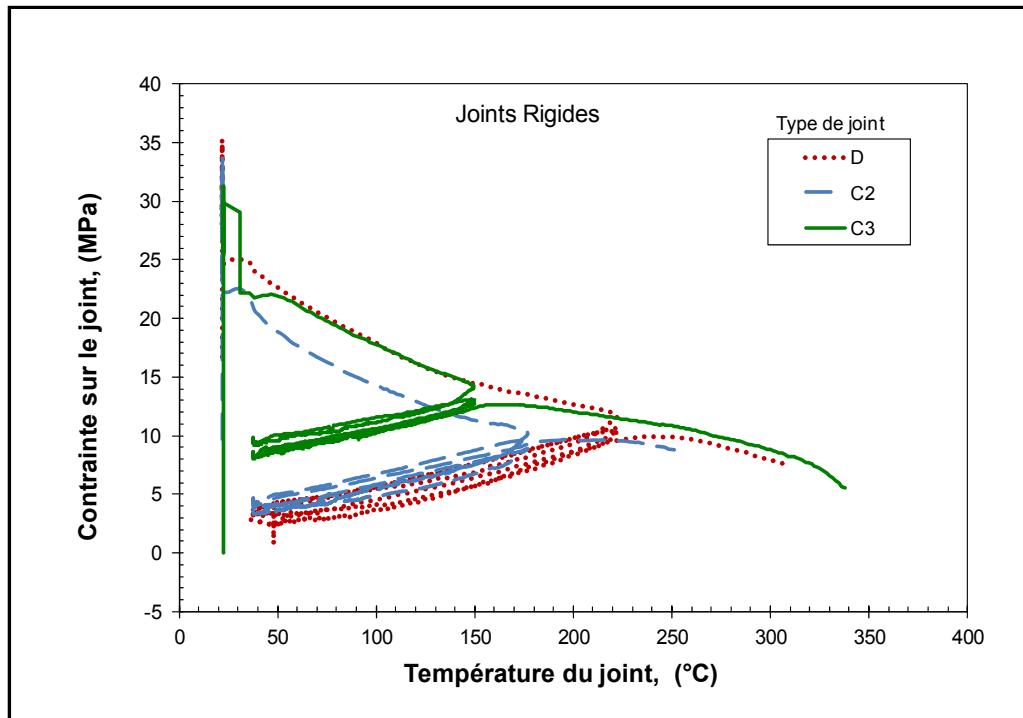


Figure 3.72 La température et la contrainte de réserve sous l'effet du type de joint

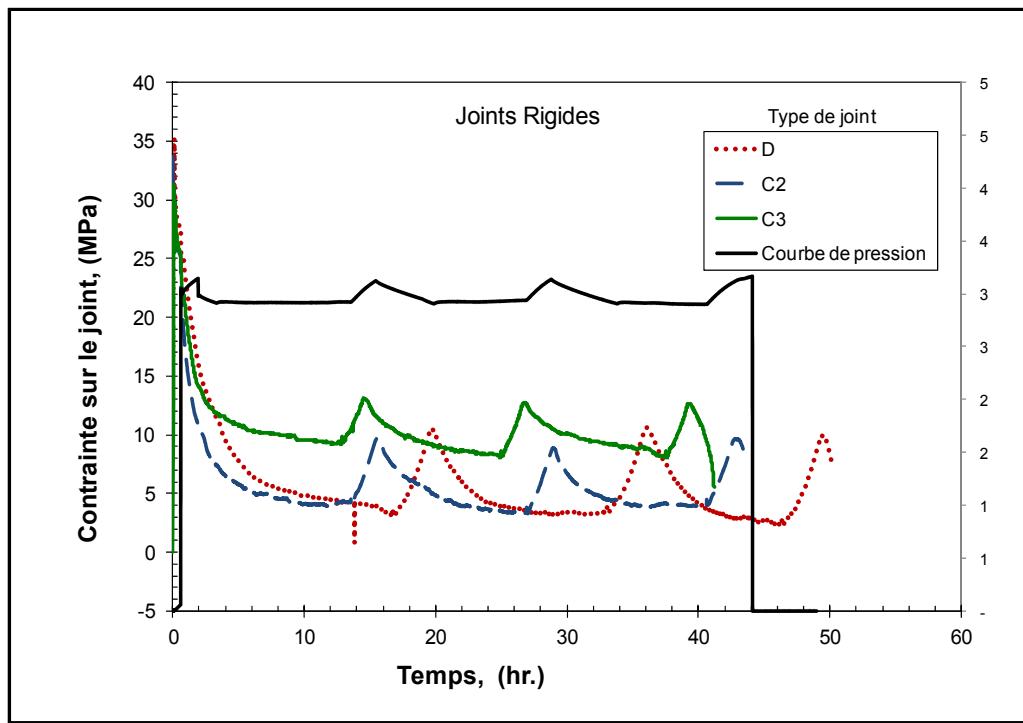


Figure 3.73 L'effet du type de joint sur la chute de contrainte

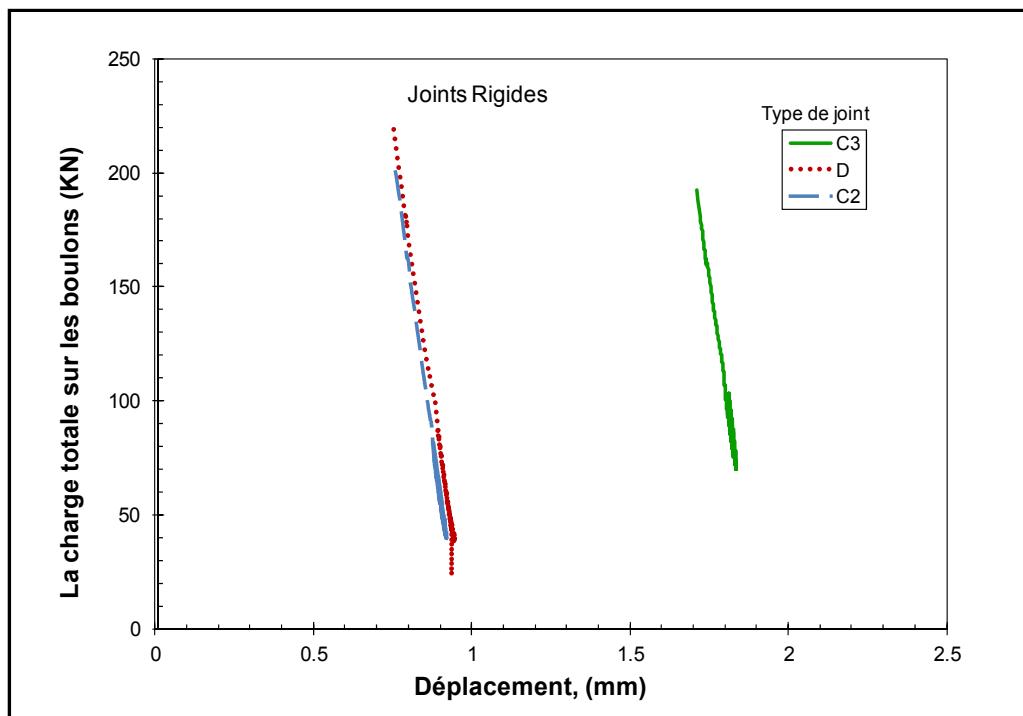


Figure 3.74 Influence du type de joint rigide sur la déformation

L'effet du type de joint sur la contrainte et la déformation est représenté aux figures 3.73 et 3.74. Il en ressort que les deux joints C2 et D ont un comportement similaire, tandis que le joint C3 présente un écart d'environ 7 MPa pour la relaxation de la contrainte. On remarque également que la pente de la courbe-charge des boulons et écrasement du joint représentant la rigidité du montage est identique dans les trois cas.

Les courbes de la figure 3.75 ont permis de déterminer la température de transition vitreuse. Un écart de 38 °C est également observé entre la température de transition vitreuse de C3 et les deux autres types (C2 et D).

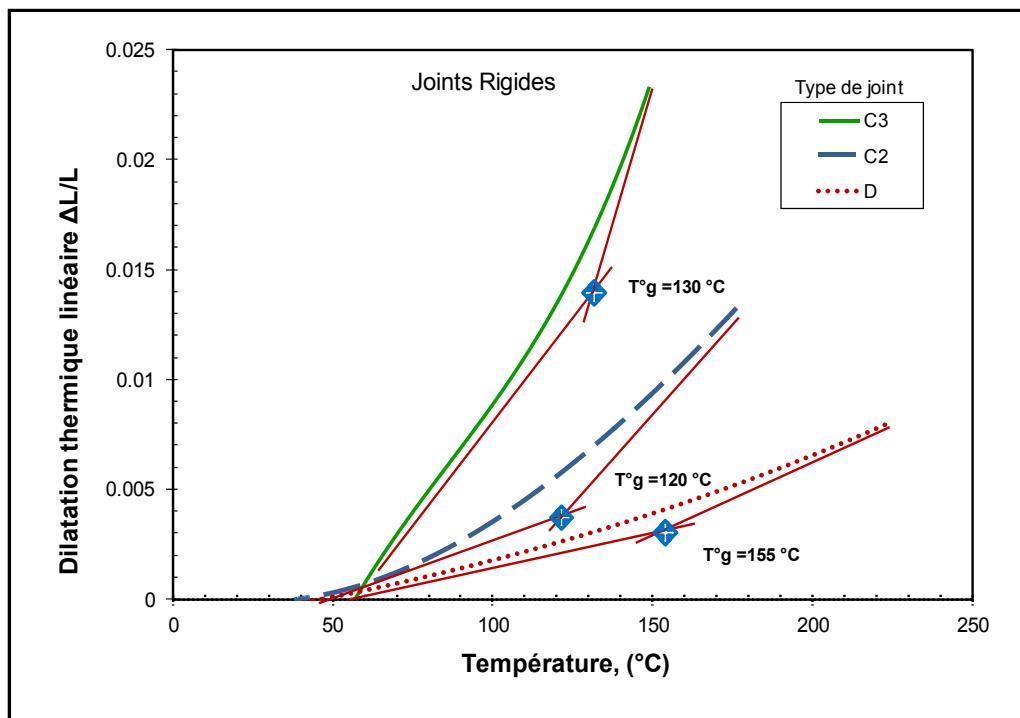


Figure 3.75 La température de transition vitreuse sous l'effet du type de joint

Les valeurs du taux de déformation ont été déduites à partir des courbes de la figure 3.71. En revanche, les données concernant le taux de compressibilité et le taux de fluage atteint à la fin du test ont été calculées à partir des équations 2.5 et 2.6.

Tableau 3.14 Valeurs récapitulatives des caractéristiques mécaniques

Caractéristiques du joint	Type de joint			
	C2	C3	D	
Épaisseur du joint au (mm)	$E_p(i)$	2,94	3,11	3,07
	$E_p(c)$	1,28	2,76	2,53
	$E_p(f)$	0,87	2,08	2,19
Taux de compressibilité (%)	57	11	12	
Taux de fluage (%)	3	4	10	
Taux de défor. cumulée(%)	70,25	32,8	28,5	

Les valeurs de la perte de contrainte sur le joint, de la température et de la contrainte atteinte à l'éclatement du joint, de même que les valeurs de réserve, ont été déduites à partir de la courbe 3.72. En revanche, les données concernent les autres caractéristiques, comme le taux de relaxation et la perte de charge dans les boulons ont été calculées à partir des équations 2.7 et 2.2.

Tableau 3.15 Valeurs récapitulatives des caractéristiques mécaniques

Caractéristiques du joint		Pression (MPa)	Type de joint		
			C3	C2	D
Perte de contrainte (MPa)	30 min	3	2,97	2,88	2,85
	Final	0	21,07	21,50	23,16
Perte de charge (KN)	30 min	3	0,19	0,088	0,013
	Final	0	33,97	34,80	37,45
Taux de relaxation (%)			75	72	75
T°bo (°C)			348,88	316,11	337,77
Sgbo (MPa)			4,12	3,64	4,21
T°R (°C)			190	105,55	137,77
SgR (MPa)			11,96	12,98	13,92

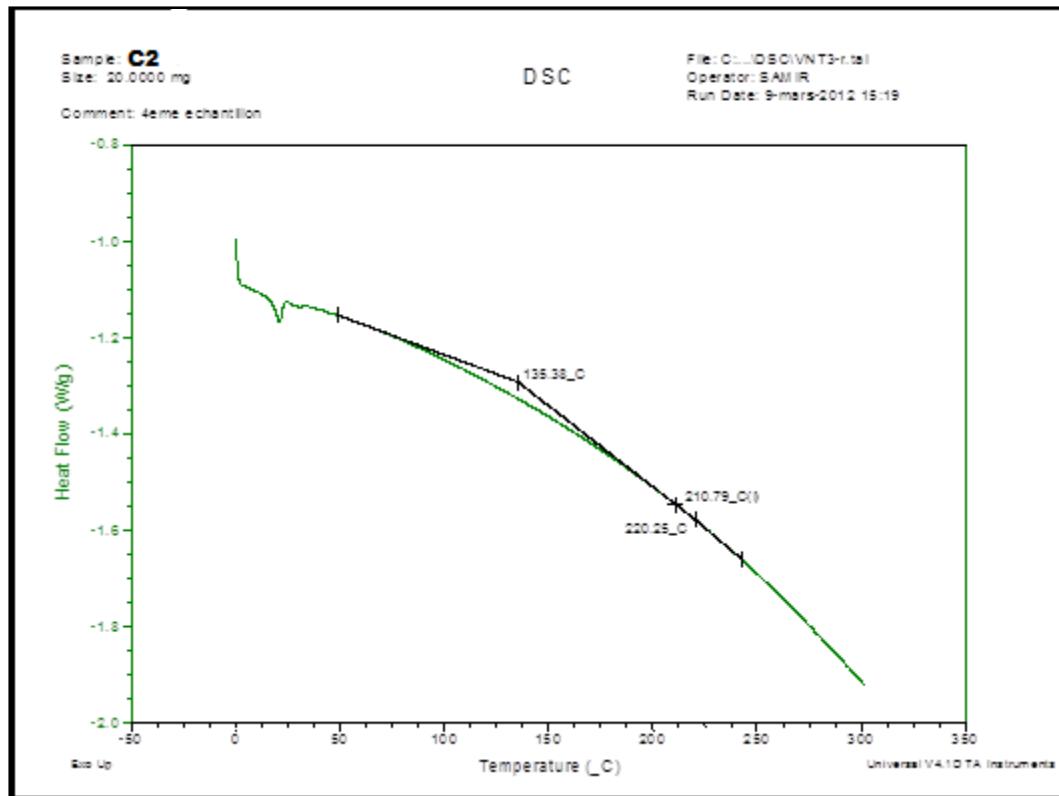


Figure 3.76 La température de transition vitreuse par DSC

L’analyse de DSC (Differential Scanning Calorimetry) révèle que le matériau C2 avec lequel le joint testé est fabriqué présente une température de transition vitreuse de 210 °C, tandis que celle déterminée à partir de la courbe du même matériau C2 présenté à la figure 3.75 correspond à 120 °C. La comparaison entre les deux méthodes servant à déterminer la température de transition vitreuse confirme qu’il existe un écart important de 90 °C entre les deux valeurs. La différence observée dépend de la vitesse de chauffage et de refroidissement utilisée durant le test.

3.3.3 Effet de l’épaisseur du joint

Les figures 3.77 et 3.78 sont une présentation des résultats des tests concernant l’effet de l’épaisseur sur les caractéristiques mécaniques du joint appartenant à la famille du matériau A2 pour trois différentes épaisseurs, 1,5875 mm, 3,175 mm et 6,35 mm. L’analyse de ces

courbes démontre que l'épaisseur du joint n'a aucun effet sur le taux de fluage. Par contre, un effet important sur la déformation cumulée est observé, plus particulièrement sur le joint à 1,5875 mm.

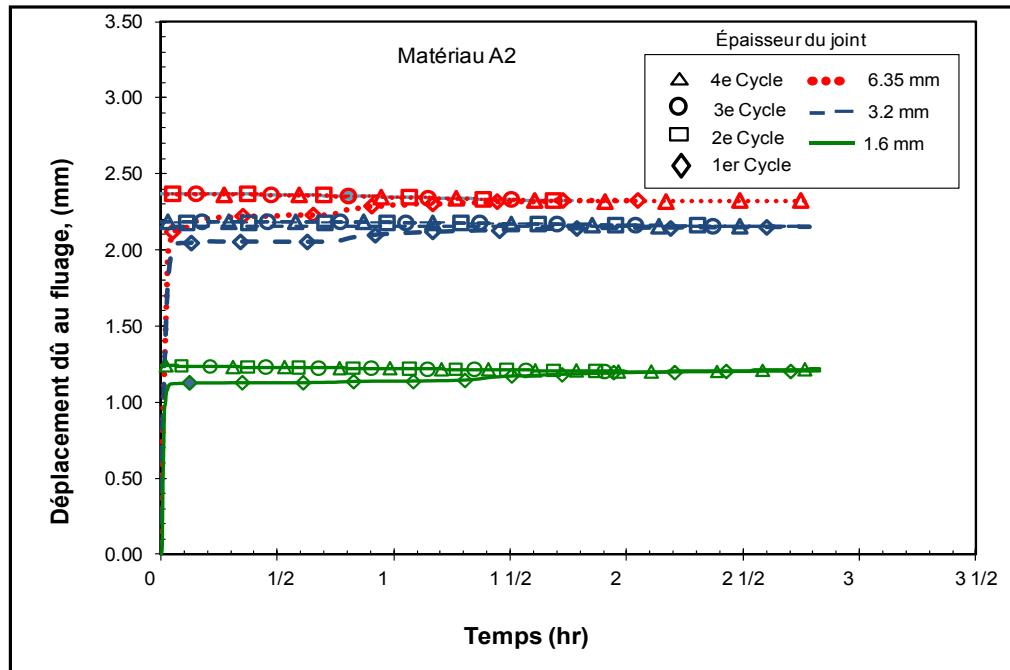


Figure 3.77 Impact de l'épaisseur sur l'évolution du fluage lors des cycles

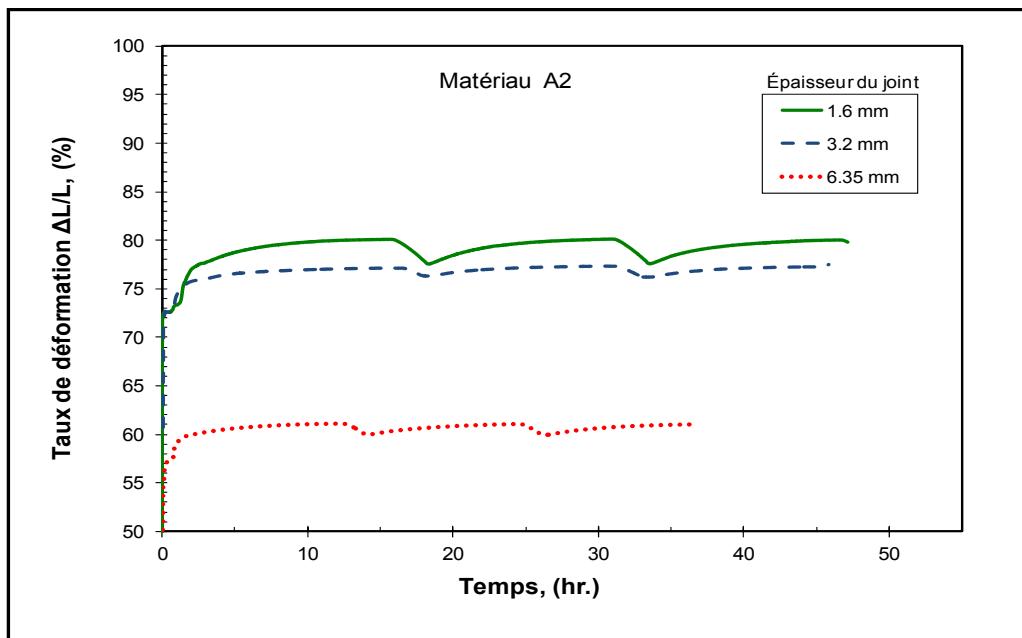


Figure 3.78 L'effet de l'épaisseur sur la déformation cumulée au cours des trois cycles de chauffage-refroidissement

Les figures 3.79 à 3.82 montrent l'effet de l'épaisseur du joint sur les paramètres mesurés lors du test HOBT avec cycles. Les tests ont été effectués sous une contrainte de 34 MPa. Il semble que l'épaisseur du joint a un effet important sur la température et la contrainte de réserve. Plus le joint est mince, plus il devient résistant à l'éclatement, comme le montre la courbe présentée à la figure 3.79.

La variation de la chute de contrainte, dans le cas des deux joints d'épaisseur 3,175 mm et 6,35 mm, est identique. Tandis qu'elle présente un écart d'environ 7 MPa entre le joint à 1,5875 d'épaisseur et les deux joints.

Selon la courbe de la déformation représentée par la figure 5.86, la pente des deux courbes appartenant au joint ayant une épaisseur de 3,175 mm et 6,35 mm est identique, contrairement à celle appartenant au joint ayant une épaisseur de 1,5875 mm.

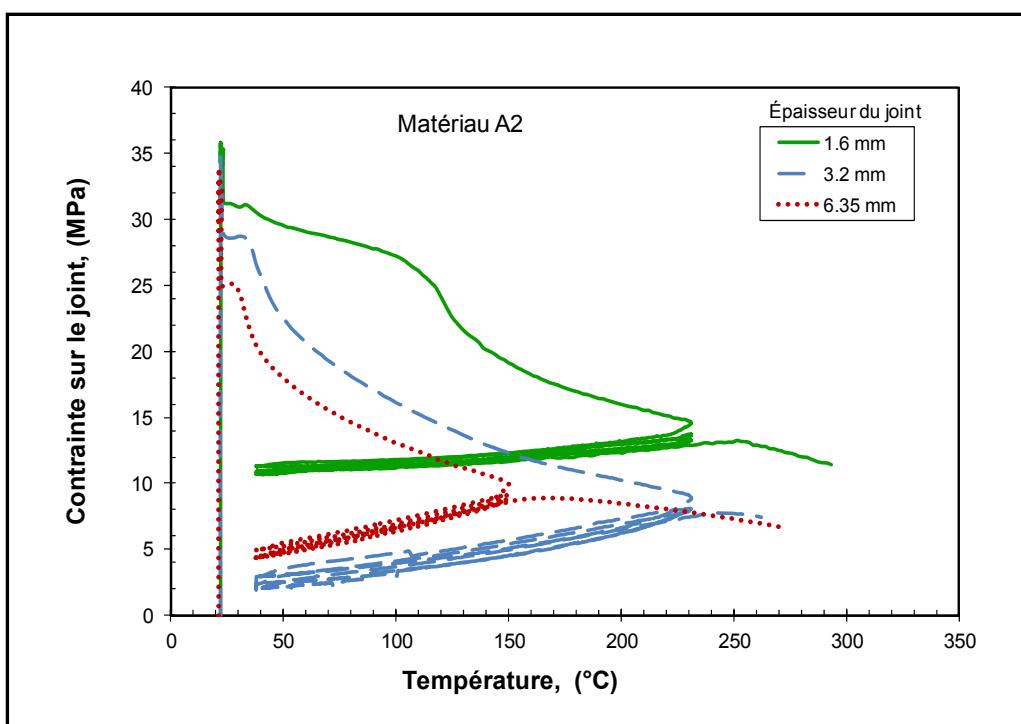


Figure 3.79 La température et la contrainte de réserve sous l'effet de l'épaisseur du joint

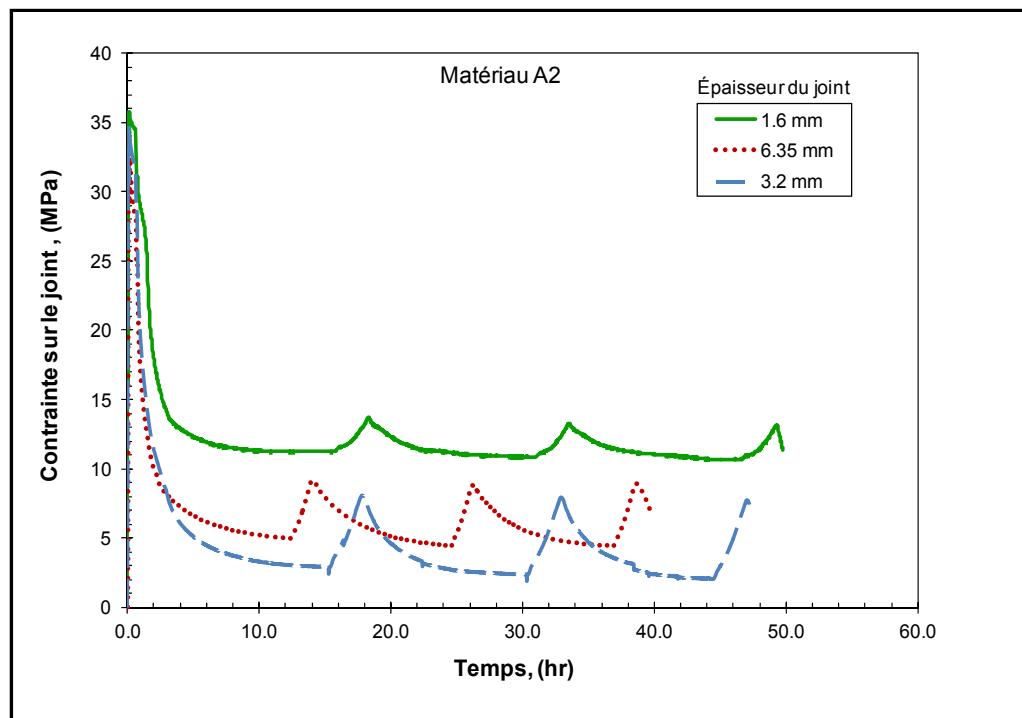


Figure 3.80 L'effet de l'épaisseur sur la chute de contrainte

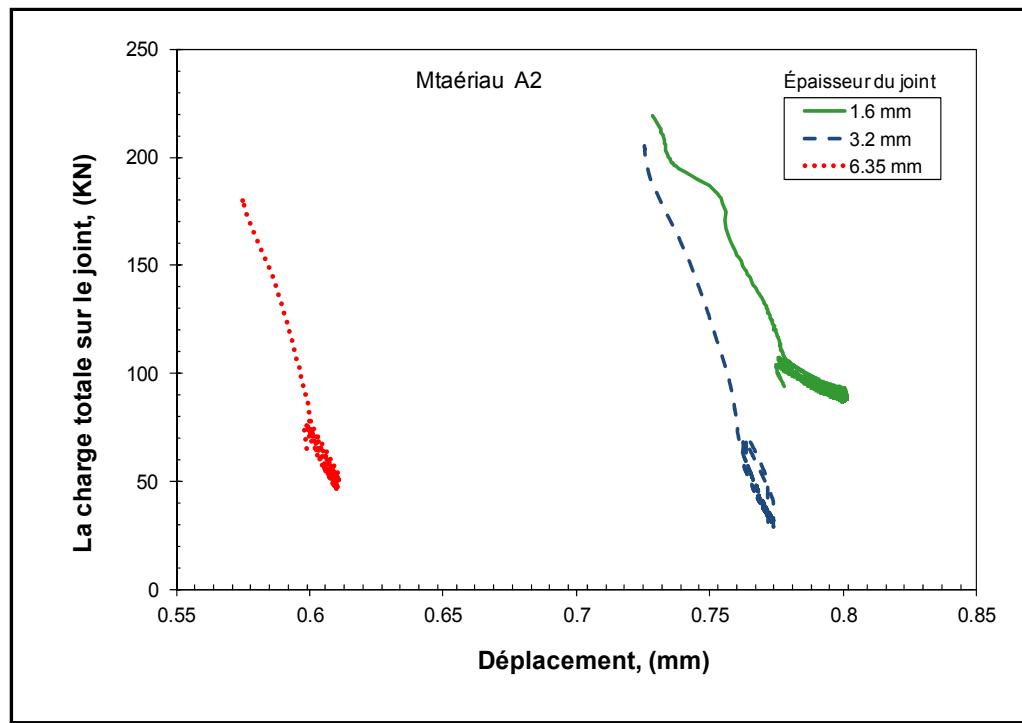


Figure 3.81 L'influence de l'épaisseur sur la déformation

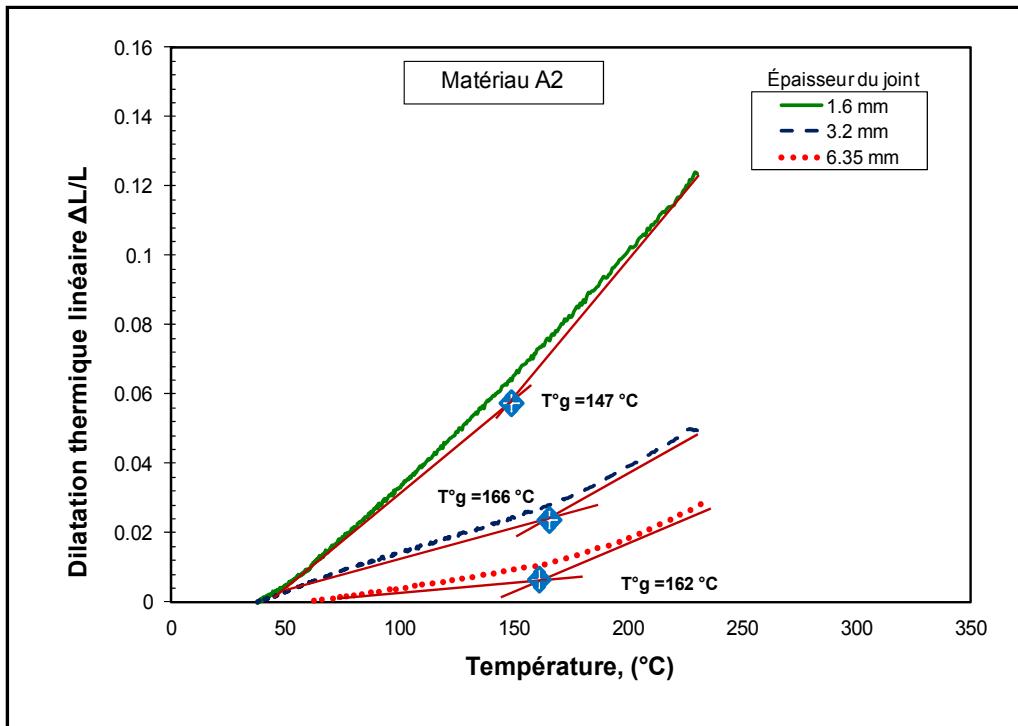


Figure 3.82 La température de transition vitreuse sous l'effet de l'épaisseur

Les trois courbes de la figure 3.82 ont permis de déterminer la température de transition vitreuse pour les trois joints ayant les épaisseurs suivantes : 1,6 mm, 3,2 mm et 6,35 mm. Le résultat affirme que la température de transition vitreuse est semblable pour les deux joints ayant les épaisseurs de 3,2 mm et de 6,35 mm. Un écart de 38 °C est observé entre la température de transition vitreuse des joints ayant une épaisseur de 3,175 mm et de 6,35 mm et celui de 1,6 mm.

Tableau 3.16 Valeurs récapitulatives des caractéristiques mécaniques

Caractéristiques du joint		Type de joint		
		1,6 (mm)	3,2 (mm)	6,35 (mm)
Épaisseur du joint (mm)	EP(i)	1,524	2,85	6,25
	EP(c)	0,44	0,77	1,70
	EP(f)	0,21	0,75	1,4
Taux de compressibilité (%)		28	27,3	44
Taux de flUAGE (%)		20	12,2	9
Taux de défor. cumulée (%)		87	74	64

Les courbes 3.77 et 3.78 ainsi que les équations 2.2, 2.5, 2.6 et 2.7 nous ont permis de déduire les caractéristiques mécaniques et thermiques pour les trois joints testés. Les valeurs des résultats sont présentées dans les tableaux 3.16 et 3.17.

Tableau 3.17 Valeurs récapitulatives des caractéristiques mécaniques et thermiques

Caractéristiques du joint		Pression (MPa)	Type de joint		
			1,6 (mm)	3,2 (mm)	6,35 (mm)
Perte de contrainte (MPa)	30 min	3	3,17	2,60	2,89
	Final	0	30,37	29,04	22,67
Perte de charge dans le boulon (KN)	30 min	3	2,20	6,0	10,0
	Final	0	53,40	48,13	38,44
Taux de relaxation (%)			59,5	74,5	71
T°(bo) Sg(bo)		(°C)	-	340,55	311,11
		(MPa)	-	1,78	4,09
T°(R) Sg(R)		(°C)	-	123,33	128,88
		(MPa)	-	14,02	11,22

Les résultats obtenus montrent que plus le joint est épais, plus la relaxation est importante et plus l'éclatement est précoce. Cependant, il faut noter que le joint doit être assez épais pour compenser les défauts de planéité et l'état de surface des brides.

3.4 Analyse comparative des résultats avec les deux procédures HOBT et TECT

Dans le but d'accomplir une étude comparative servant à évaluer la pertinence de chaque procédure, notamment en ce qui concerne les mesures du taux du fluage et de relaxation des joints à base de PTFE, plusieurs essais ont été réalisés selon les procédures TECT et HOBT déjà décrites au chapitre 2, en fonction des conditions suivantes :

- une contrainte de 34 MPa;
- une température de 204 °C;
- une pression interne de 0 MPa.

Les paramètres qui seront mesurés durant cette étude comparative sont :

- le taux d'écrasement du joint;
- les taux de fluage et de relaxation;
- le coefficient d'expansion thermique;
- la température de transition vitreuse.

3.4.1 Taux d'écrasement du joint

Selon les deux procédures exploitées dans cette étude, deux catégories de joints appartenant à deux familles différentes ont été testées. Le tableau ci-dessous représente le taux d'écrasement mesuré selon la procédure TECT et HOBT, ainsi que l'écart observé dans le cas des joints mous et des joints rigides. Il semble que l'écart observé est avoisinant dans les deux cas. Cela signifie que les résultats obtenus par les deux procédures sont proches.

Tableau 3.18 Comparaison du taux d'écrasement avec deux procédures

Familles des joints		Écrasement (%)		Écart (%)
		HOBT2	TECT	
Joints mous	A1	77,2	-	58.8
	A1	-	31,8	
Joints rigides	C1	57	-	42.1
	C1	-	33	

3.4.2 Taux de fluage-relaxation

Le tableau 5.20, regroupant les valeurs calculées du taux fluage et relaxation, montre un écart très important entre les deux procédés. Cela revient probablement au type de bride, qui joue un rôle important sur le fluage-relaxation.

Tableau 3.19 Valeurs comparatives du taux d'écrasement du joint par les deux procédures

Familles des joints	Taux de fluage (%)		Taux de relaxation (%)	
	Type de procédure			
	HOBT2	TECT	HOBT	TECT
A1(HOBT)	6,14	-	83	-
A1(TECT)	-	63	-	3,22
Écart (%)	90,25		96,12	

3.4.3 Le coefficient d'expansion thermique

Les valeurs du coefficient d'expansion thermique citées dans le tableau 3.21 montrent un écart important entre les deux procédures, pouvant aller jusqu'à 57 %. Cette différence peut être attribuée à l'effet de l'état de surface de contact entre le joint et la bride.

Tableau 3.20 Comparaison du coefficient d'expansion thermique par les deux procédures

Familles des joints	CET (m/m/°C)		Écart (%)
	Procédure HOBT2	Procédure TECT	
C	59	128	54
D	53	93	43
B	134	100	25
A	170	73	57

3.4.4 La température de transition vitreuse

Les valeurs de la température de transition vitreuse mesurées à partir des tests d'éclatement à chaud (HOBT), des tests de mesure du coefficient d'expansion thermique (TECT) et de la méthode DSC sont regroupées dans le tableau 3.22. L'écart entre les trois cas est de l'ordre de 10 % au maximum.

Tableau 3.21 Comparaison de la température de transition vitreuse par les trois procédures

Familles des joints	Température de transition (°C)			Écart Max. (%)
	HOBT2	TECT	DSC	
Joints mous A1	167	180	183	8,01
Joints rigides C2	154	151	135	11.29

CONCLUSION

Cette étude a servi de base pour présenter tous les résultats concernant l'évaluation de la performance des joints à base de teflon. Les tests réalisés sur le montage TECT et HOBT2 ont été présentés en détail. Afin de mieux connaître la performance des joints à base de PTFE, l'effet de plusieurs paramètres sur le comportement des différentes familles de joints testées a été étudié et discuté. Nous avons pu mettre en évidence la pertinence des deux procédures employées, notamment en ce qui concerne la résistance à l'éclatement et au fluage.

L'un des moyens les plus fiables permettant de minimiser le taux de défaillance des joints d'étanchéité et d'assurer une meilleure performance est la conception reliée aux conditions du service. En règle générale, le choix d'un joint d'étanchéité dépend de son domaine d'utilisation, plus précisément des caractéristiques et exigences reliées à la conception. L'évaluation traditionnelle des propriétés ne donne pas des informations correctes sur le comportement mécanique et thermique des joints dans les conditions d'exploitation réalistes.

Dans ce projet, un banc d'essai pour mesurer l'écrasement, le coefficient d'expansion thermique et le fluage des joints d'étanchéité a été amélioré et étalonné avec succès. Les tests effectués sur quatre familles de joints révèlent que le coefficient de dilatation thermique ne dépend pas des caractéristiques de chauffage (taux, cycles, temps de maintien). Cependant, il y a un effet de la charge dû à la densification de la matière avec laquelle le joint a été fabriqué.

Le coefficient de dilatation thermique linéaire du matériau a été déterminé sur une plage de température variant entre 38 °C et 260 °C. Il semble qu'il y ait un petit changement observé au niveau de l'évolution du coefficient de dilatation thermique dans cette plage de température, selon le type de joint.

Selon la littérature, la température de transition vitreuse du PTFE est un paramètre critique. La majorité l'estime à 128 °C. Les données recueillies lors de notre étude expérimentale ont révélé que la température de transition vitreuse est proche de celle obtenue par la technique DSC (differential scanning calorimetry), avec un écart de 11 %. À l'avenir, les données devront être obtenues à des températures plus élevées, jusqu'à ce que la température de transition vitreuse s'approche de celle déterminée par la technique DSC.

L'amélioration apportée au banc d'essai HOBT a permis de mesurer directement l'écrasement du joint. Notre objectif principal était de déterminer l'influence de certains paramètres permettant l'évaluation des performances à l'éclatement des joints. En effet, une procédure d'éclatement de joint à chaud connue sous le nom HOBT (Hot Blow-out Test) a été améliorée. Celle-ci permet de déterminer la température et la contrainte de réserve, la déformation cumulée et le taux de fluage-relaxation, sous l'effet de la contrainte initiale de serrage. La pression interne, la température, le nombre de cycles de refroidissement et le temps de maintien de la température sont autant de paramètres à considérer. C'est justement ce qui constitue l'objectif principal de notre étude. Les résultats obtenus montrent la relaxation de la contrainte sur le joint en fonction de la température et illustrent que la contrainte et la température d'éclatement permettent de déterminer cette limite. Cependant, afin de bien évaluer celle-ci, plusieurs paramètres doivent être pris en considération.

Les résultats des essais expérimentaux démontrent l'effet de la contrainte initiale, l'effet du maintien de la température et l'effet de l'épaisseur sur la température et la contrainte de réserve. L'effet des autres caractéristiques est moins important. Le nombre de cycles a un effet important sur la déformation cumulée; un écart de 12 % entre le premier cycle et le vingtième cycle a été observé. Par contre, pour la chute de contrainte, les résultats indiquent une stabilité à partir du dixième cycle.

Parmi les points importants qui ont été déjà abordé dans la conclusion, nous citons :

- Pertinence des deux procédures employées, notamment en ce qui concerne la résistance à l'éclatement et au fluage.
- Le choix d'un joint d'étanchéité dépend de son domaine d'utilisation, plus précisément des caractéristiques et exigences reliées à la conception.
- Le coefficient de dilatation thermique ne dépend pas des caractéristiques de chauffage (taux, cycles, temps de maintien). Cependant, il y a un effet de la charge dû à la densification de la matière avec laquelle le joint a été fabriqué.
- l'effet de la contrainte initiale, le maintien de la température et l'épaisseur sur la température et la contrainte de réserve ont été démontré. L'effet des autres caractéristiques est moins important.
- la température de transition vitreuse qui est proche de celle obtenue par la technique DSC (Differential Scanning Calorimetry), nous renseigne sur la plage de température de service.

RECOMMANDATIONS

Compte tenu des résultats, nous déduirons donc quelques perspectives permettant de poursuivre l'évaluation de la performance des joints à base de PTFE.

- La vitesse de refroidissement de l'assemblage à brides boulonnées semble être un facteur important pouvant être pris en considération. En effet, une vitesse de refroidissement plus ou moins rapide peut avancer ou retarder la transition vitreuse du matériau, sachant que la température de transition vitreuse a un lien direct avec la détermination de l'expansion thermique du matériau servant à prédire la température de réserve du joint.
- Il serait également intéressant d'envisager la possibilité de varier la rigidité de l'assemblage à brides boulonnées en utilisant des rondelles Belleville. L'introduction des rondelles Belleville minimise la chute de contrainte sur le joint.
- Le montage TECT utilise des brides à surface lisse, contrairement à ce qui est utilisé dans l'industrie. La capacité d'étanchéité dépend fortement de l'état de surface des brides, surtout en ce qui concerne le débit des fuites. En effet, il est plus facile d'assurer une bonne étanchéité avec un état de surface possédant des stries éloignées. Donc, il serait très important d'envisager la possibilité d'utiliser des brides à surface à stries éloignées, afin de permettre au joint de s'introduire au fond.
- Permet de valider les mesures de la température de transition vitreuse effectuées par les deux procédures HOBT et TECT par la méthode DSC. Il est probablement important d'envisager de modifier les conditions des tests, notamment en ce qui a trait à la vitesse du chauffage. Il est à noter que la vitesse de chauffage utilisée dans les procédures TECT et HOBT est de 3 °F/min. Par contre, elle était de 10 °C/min pour la méthode DSC.
- Il serait intéressant de prendre en considération l'effet de la porosité sur les caractéristiques mécaniques et thermiques

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abid, M., M. Iqbal et B. Ullah. 2009. « Comparative thermal stress analysis of gasketed and non- gasketed flange joints for safe operating conditions ». *Process Mechanical Engineering*, vol. 223, 13 p.
- Araki, Yoshio. 1965. « Thermal Expansion Coefficient of Polytetrafluoroethylene in the Vicinity of Its Glass Transition at about 400 °K ». *JOURNAL OF APPLIED POLYMER SCIENCE*, Nippon Valqua Industries Ltd., Atsugi City, Japan, vol. 9, p. 421-427.
- Araki, Yoshio. 1965. « Stress Relaxation of Polytetrafluoroethylene in the Vicinity of Its Glass Transition Temperature at about 130 °C ». *JOURNAL OF APPLIED POLYMER SCIENCE*, Nippon Valqua Industries Ltd., Atsugi City, Japan vol. 9, p. 1515-1524.
- ASTM C832-89, Standard Test Method of Measuring the Thermal Expansion and Creep of Refractories under Load.
- ASTM E228-95, Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials with Vitreous Silica Dilatometer.
- ASTM E831-93, Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis.
- ASTM D696-91, Standard Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics between -30 °C and 30 °C.
- Bickford, John H. et Sayed Nassar. 1998. « Handbook of bolts and bolted joints ». éditeur : Marcel Dekker, inc., New York.
- Birembaut, Yves, Thierry Ledauphin, Michel Direne, Jean Cyprien Vignaud et J. R. Payne 1997. « Bolted Flanged Gasketed Joints Technologie : « Comparison of North American and European Approaches ». *Currents Topics in the Design and Analysis of Pressure Vessels and Piping ASME*, PVP-vol. 354, p. 209-242.
- Bouzid, A., M. Derenne, L. Marchand et J. R. Payne. 2001. « Service Temperature Characterization of Polytetrafluoroethylene Based Gaskets » *ASTM Journal of Testing and Evaluation*, vol. 29, n° 5, p. 442-452.
- Brian, R. Grawburg et J. Ronald Winter. 1993. « Fugitive Emissions and Flange Gaskets : Guidelines for Selection, Installation, and Maintenance in the Pulp and Paper Industry », Proceedings Engineering Conference Papres (ENG93, 1993), p. 149-159.

- Briskman, A. et K. B. Tlebaev. 2007. « Radiation Effects on Thermal Properties of Polymers. II Polytetrauoroethylene ». *High Performance Polymers*, vol. 20, n°1, p. 86-114.
- Brydson, John. 1999. Chapter 4 - Relation of Structure to Thermal and Mechanical Properties Plastics Materials, Seventh Edition Elsevier Science and Technology Books, Inc. 1999.
- Chen, Xu et Hui Shucui. 2005. « Ratcheting behavior of PTFE under cyclic compression ». *School of Chemical Engineering & Technology*, Tianjin University, Tianjin 300072, China Received 3 June 2005; accepted 15 July 2005.
- Cipolatti, Carlos F.A. et Teedit Ind.com. Veiga. 2004. « Determination of critical temperature of compressed non asbestos fiber sheet gaskets ». *Analysis of Bolted Joints ASME, PVP* - vol. 478, july 25-29, p. 57-59.
- Derenne, M., L. Marchand et J. Payne. 1999. « Polytetrafluoroethylene (PTFE) Gasket Qualification ». coll. « Welding Research Council Bulletin », 442, New York (USA) : the Pressure Vessel Research Council of the Welding Research council, inc., 47 p.
- Engeln, I., R. Hengl et G. Hinrichsen. 1984. « Thermal expansion and Young's modulus of uniaxially drawn poly (tetrafluoroethylene) in the temperature range from 100 to 400 K ». Technical University of Berlin, Institute of Nonmetallic Materials, Polymer Physics, Colloid & Polymer, p. 780-787.
- Fukuoka, Toshimichi et Xu Quantuo. 2002. « Finite Element Simulation of the Tightening Process of Bolted Joint With a Bolt Heater ». *J. Pressure Vessel Technol*, vol. 124, n° 4, 8 pages.
- Hammant, B.L. et J. Roberts. 1968. « Comparative Stress Relaxation Tests for Two Grades of Polytetrafluoroethylene ». Ministry of Technology Explosives Research and Developement Establishment, Technical Memorandum n° 8/1/68
- Huang, James et Yuan-Haun Lee. 2000. « Evaluation of uni-axially expanded PTFE as a gasket material for fluid sealing applications ». *Materials Chemistry and Physics*, vol. 70 (2001), p. 197–207.
- Hwang, D. Y. et J. M. Stallings. 1994. « Finite element analysis of bolted flange connections ». *Computt & Srnrcrur*, vol. 51, n°5, p. 521-533.
- Keywood, S. 1992. « Testing and Evaluation of PTFE-based Gaskets for Chemical Plant Service ». *Pressure Vessel and Piping*, vol. 236, Valves, Bolted Joints, Pipe Supports, and Restraints, ASME, p. 103–112.
- Kirby, K. Richard. 1965 « Thermal expansion of Polytetrafluoroethylene (TEFLON) from 190 °C TO +300 °C ». *ASME Journal of research of the national Bureau of Standards*, vol. 57, n° 2, p. 91-94.

- Krishna, M. Murali, M. S. Shunmugam et N. Siva Prasad. 2007. « A study on the sealing performance of bolted flange joints with gaskets using finite element analysis ». *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 84, p. 349-357.
- Ohmura, Takahiro, N. Junich, K. Hanashima et T. Sawa. 2006. « Measurements of thermal properties of gaskets for the design of bolted flange joints under thermal conduction conditions ». In *ASME Pressure Vessels and Piping Conference*. (Vancouver, BC Canada, july 23-27 2006), p. 183-91. Pressure Vessels and Piping.
- Okada, Yoshio. 1992. « The Thermal Expansion Coefficient of Polypropylene and related Composites », Thèse en chimie, Department of Chemical Engineering, Montreal, McGill University, 135 p.
- Payne, J. R., A. Bazergui, M. Derenne et L. Marchand. 1990. « Evaluation of test methods for asbestos replacement gasket materials : Final report of MTI project ». *MTI Publication*, vol. 36, n° 47. Houston : Material Technology Institute of the Chemical Process Industries.
- Rae, P. J. et D. M. Dattelbaum. 2004. « The properties of poly(tetrafluoroethylene) (PTFE) in Compression ». *Polymer*, vol. 45, p.7615–7625.
- Rodriguez, Ernesto L. 1986. « Thermal Effects in Polytetrafluoroethylene at High Hydrostatic Pressures ». *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 32, p. 4049-4061.
- Savage, Eric. 1999. « Caractérisation en température fluage-relaxation des joints d'étanchéité à base de PTFE ». Mémoire de maîtrise en génie mécanique, Montréal, École Polytechnique de Montréal, 138 p.
- Tandon, G. P. et A. Chatterjee. 1991. « The transverse coefficient of thermal expansion of a unidirectional composite ». *AdTech Systems Research Inc.*, 1342, North Fairfield Road, Dayton, OH 45432, USA, p. 2759-2764.
- Thorn, F. C. 1936. « GASKETS ». *Garlock Packing Company*, Palmyra, N. Y.
- Touloukian, Kirby, R. T., Taylor, R. E., et Lee, T. Y. R. 1977. « Thermal Expansion Non-metallic Solids ». *Thermophysical Properties of Matter*, vol. 13, Purdue Research Foundation, IFI/Plenum, p. 1443–52.
- TTRL (Tightness Testing & Research Laboratory). 1995. PTFE Gasket Qualification Project., Montréal, Final Report, École Polytechnique.

- Veiga, José C., Carlos F. Cipolatti, Ana M. F. de Sousa et David W. Reeves. 2007. « An experimental investigation of the factors that contribute to the creep-relaxation of compressed non-asbestos gasket ». *Pressure vessel and piping division conference*, (San Antonio, July 22-26, 2007), p. 1-13. Texas: ASME.
- Youxi, Lin, Gao Chenghui, Chen Minghui. 2008. « Thermomechanical Properties and Tribological Behavior of CaCO₃ Whisker Reinforced Polyetheretherketone Composites », College of Mechanical Engineering & Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China, p. 319-321.
- Zetenev, Yu. V. et A. G. Novikov. 1966. « Investegation of Stress Relaxation on Compressed Polytetrafluoroethylene », *Mekhanika Polimerov*, vol. 2, n° 2, p. 234-239.

