



**HAL**  
open science

## Types de joints et de montage

Roger Argoud, Jacques Roux

► **To cite this version:**

Roger Argoud, Jacques Roux. Types de joints et de montage. Mottin, Stéphane and Lelièvre, Gérard. Matériaux et joints d'étanchéité pour les hautes pressions, 18, MRCT-CNRS, pp.137-157, 2011, Intégrations des savoirs et des savoir-faire, 978-2-918701-04-0. 10.5281/zenodo.400491 . hal-01472113

**HAL Id: hal-01472113**

**<https://hal.science/hal-01472113>**

Submitted on 30 Mar 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

[Cliquer sur le sommaire pour parcourir plus vite ce document.](#)

<b><u>Types de joints et de montages</u></b> .....	<b>151</b>
<u>1 – Introduction</u> .....	151
<u>2 – Généralités</u> .....	151
<u>2 – 1. Joints à serrage externe</u> .....	152
<u>2 – 2. Joints auto-serrant</u> .....	153
<u>3 – Joints à basse pression</u> .....	153
<u>4 – Joints cône sur cône</u> .....	154
<u>4 – 1. Raccords de tuyauterie pour haute pression</u> .....	155
<u>4 – 2. Autres connexions cône sur cône</u> .....	156
<u>4 – 3. Vannes d'isolement</u> .....	157
<u>5 – Joints Bridgman champignon</u> .....	158
<u>5 – 1. Obturateurs simples</u> .....	158
<u>5 – 2. Obturateurs chauds</u> .....	159
<u>5 – 3. Variantes hybrides</u> .....	159
<u>5 – 4. Passages isolés</u> .....	160
<u>6 – Joints annulaires auto-serrés</u> .....	161
<u>6 – 1. Joints plastiques de faible angle</u> .....	161
<u>6 – 2. Joints plastiques-élastiques d'angle moyen</u> .....	163
<u>6 – 3. Joints élastiques à deux bagues</u> .....	163
<u>7 – Joints coniques d'Amagat</u> .....	163
<u>8 – Autres joints</u> .....	165
<u>8 – 1. Le joint pour cellule à enclumes de diamant</u> .....	166
<u>8 – 2. Un exemple de réalisation : vanne à très haute pression</u> .....	168
<u>9 – Conclusion</u> .....	169
<u>10 – Bibliographie</u> .....	170

Liens : <https://doi.org/10.5281/zenodo.400491>

<http://www.sudoc.fr/155436619>

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01472113>

<https://hal.archives-ouvertes.fr/INTEGRATIONS/page/materiaux-et-joints-etancheite-pour-les-hautes-pressions>

<https://zenodo.org/communities/integrations>

### Référence au format BibTeX :

```
@inbook{11materiaux18_2011,
location = {Meudon},
edition = {{3e éd.}},
title = {Types de joints et de montage},
isbn = {978-2-918701-04-0},
url = {http://www.sudoc.fr/155436619},
series = {Intégrations [des savoirs et des savoir-faire]},
abstract = {Préface / Dominique Leguillon P. 17. Introduction générale / Patrick Boissinot, Patrick Langlois, Agílio A.H. Pádua P. 21. Introduction au dimensionnement / Agílio A.H. Pádua 1 — Définition du problème 2 — Dimensionnement 3 — Obturateurs 4 — Conclusion P. 31. Frettage et autofrettage / Patrick Langlois 1 — Considérations préliminaires au frettage 2 — Frettage d'une enceinte bibloc 3 — Frettage d'une enceinte multibloc 4 — Formulation de l'autofrettage 5 — Modes de réalisation de l'autofrettage 6 — Conclusion P. 55. Méthodes d'éléments finis en calcul de structures élastiques / Joël Frelat 1 — Introduction 2 — Rappel de la formule théorique 3 — Formulation variationnelle 4 — Formulation numérique 5 — Etapes d'une mise en œuvre pratique 6 — Conclusion — Extension aux problèmes non linéaires P. 65. Les matériaux sidérurgiques et les hautes pressions / Jean-Paul Dichtel 1 — Caractérisation mécanique des aciers 2 — Métallurgie des aciers et superalliages 3 — Commentaires : la Directive Européenne Appareils à Pression P. 77. Les métaux non ferreux — Alliage cuivre-béryllium et titane / Jean-Pierre Petitet 1 — Introduction 2 — Le cuivre-béryllium 3 — Le titane P. 85. Les Carbures cémentés (WC)-Co / Emmanuel Pauty 1 — Les procédés de fabrication 2 — Les propriétés des carbures cémentés 3 — Conclusions P. 99. Choix et usinage des carbures de tungstène / Jacques Calzas 1 — Choix des carbures de tungstène 2 — Usinage du carbure de tungstène P. 111. Céramiques et matériaux pour l'optique / Jean-Claude Chervin 1 — Céramiques 2 — Matériaux pour l'optique P. 141. Types de joints et de montage / Roger Argoud et Jacques Roux 1 — Introduction 2 — Généralités 3 — Joints à basse pression 4 — Joints cône sur cône 5 — Joints Bridgman Champignon 6 — Joints annulaires auto-serrés 7 — Joints coniques d'Amagat 8 — Autres joints 9 — Conclusion P. 161. Joints hautes pressions pour la compression de gros volumes solides / Sylvie Le Floch 1 — Joints solides utilisés dans les différents types d'enceintes hautes pressions 2 — Matières premières des joints 3 — Assemblages (HP)-(HT) P. 173. Le matériel standard / Jean-Pierre Petitet 1 — Tubes, conduites et raccords 2 — Les vannes 3 — Quelques types d'enceintes commercialisées 4 — Les générateurs de pression 5 — Le matériel moins standard P. 187. Assemblages haute pression / Gérard Hamel 1 — Montage des raccords de pressions 2 — Montage de quelques passages électriques 3 — Les passages de thermocouple 4 — Les passages optiques, montage des fenêtres 5 — Montage des joints et des obturateurs sur une cellule haute pression P. 197. Usinage / Jean-Pierre Michel 1 — Introduction 2 — Les joints de faible épaisseur 3 — Les bagues anti-extrusion à 45° 4 — Les joints à 45° 5 — Les joints « double Bridgman » 6 — Les joints plats en élastomères 7 — Les joints en indium (étanchéité en hélium et azote liquide 8 — Joints métal-métal type Lens ring 9 — Les passages du courant 10 — Usinage de matériaux exotiques P. 211. Les règles de sécurité / Patrick Boissinot 1 — Dangers présentés par les appareils à pression 2 — Appareils à pression rencontrés dans les laboratoires et facteurs de risques 3 — Principes généraux de prévention et réglementation 4 — Moyens de protection 5 — Conclusion},
pages = {137--157},
number = {18},
booktitle = {Matériaux et joints d'étanchéité pour les hautes pressions},
publisher = {{MRCT}-{CNRS}},
author = {Argoud, Roger and Roux, Jacques},
bookauthor = {Boissinot, Patrick and Langlois, Patrick and Pádua, Agílio},
editor = {Mottin, Stéphane and Lelièvre, Gérard},
editorb = {Mottin, Stéphane},
editorbtype = {redactor},
date = {2011},
langid = {french},
keywords = {Hautes pressions -- Matériaux, Joints d'étanchéité, Matériaux -- Effets des hautes pressions}, doi = {10.5281/zenodo.400491},
}
```

# Types de joints et de montages

*Roger Argoud\* et Jacques Roux\*\**

\*CNRS/Laboratoire de Cristallographie, BP 166 - 38042 Grenoble Cedex 9

\*\*CNRS -IPGP boîte 89, Physique des Minéraux et des Magmas  
4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05

## 1 – Introduction

Ce chapitre expose les principes de fonctionnement de systèmes de joints usuels dans le domaine des moyennes pressions (approximativement de 1 MPa à 1 GPa). Ce sujet a fait l'objet de plusieurs monographies très complètes (cf. bibliographie sommaire) suite à celle de Bridgman. Une des difficultés à surmonter pour le néophyte est d'apprécier les qualités respectives de la multitude de dispositifs décrits dans ces ouvrages et d'extraire les critères principaux de choix de leur mise en œuvre. On ne réalisera donc pas une liste exhaustive des dispositifs documentés. On rappelle seulement les principes généraux qui pour l'essentiel sont exposés dans les travaux de Bridgman et la bibliographie à la fin de ce chapitre. Puis on décrira les principaux types de joints illustrés de façon concrète par des montages en service dans des laboratoires français. Le but poursuivi est de décrire un certain nombre de montages et d'applications typiques qui illustrent la mise en œuvre des principes généraux de fonctionnement des joints. Le but est de familiariser le lecteur avec des montages et des solutions éprouvées par l'usage, de comprendre pourquoi tel dispositif particulier fonctionne (ou non), quelles sont ses principales caractéristiques (qualités ou défauts) et de fournir ainsi les moyens à l'expérimentateur de dialoguer efficacement avec un concepteur d'appareillage haute pression, de modifier un équipement existant ou de le mettre en œuvre convenablement. On a privilégié dans la mesure du possible des exemples simples de systèmes polyvalents, utilisant des techniques accessibles au laboratoire non spécialisé. Ce choix traduit aussi inévitablement l'expérience particulière des auteurs. Enfin les valeurs limites de fonctionnement dans le texte sont données à titre indicatif comme bornes de domaines de fonctionnement fiables et non comme limites extrêmes d'une technique.

## 2 – Généralités

Précisons tout d'abord que l'on appellera joint, par abus de langage, un dispositif qui assure l'étanchéité entre une partie fixe telle que le corps d'une enceinte et une partie amovible servant par exemple de bouchon. On peut distinguer deux principaux types de joints : une première famille, *les joints à serrage externe*, dont l'étanchéité est obtenue par un serrage contre la pression de fluide à confiner et une seconde famille, celle des *joints auto-serrant*, qui utilisent au contraire la pression du fluide pour établir le serrage des composants du système de joint.

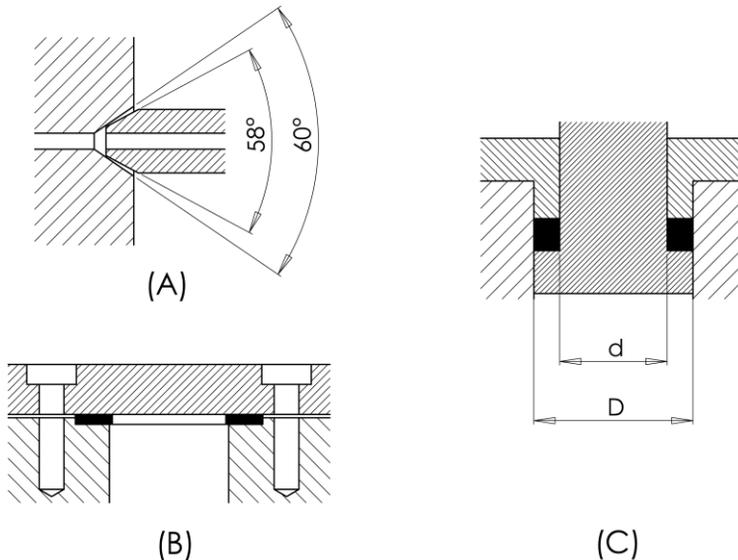


Figure 1. – **Joints à serrage externe** : (A) Cône sur cône; (B) joint plat déformable. **Joints auto-serrés** : (C) Joint Bridgman de type champignon ( $d$  est le diamètre de l'aire non supportée,  $D$  le diamètre total du joint).

## 2 – 1. Joints à serrage externe

Le dispositif le plus simple est un contact entre deux pièces sans intermédiaire. Les parties fixe et amovible de l'assemblage sont serrées l'une contre l'autre par un moyen ad hoc. Un joint (sensu stricto) déformable plastiquement peut être inséré entre les deux pièces pour compenser les défauts de surface. L'étanchéité est obtenue si la pression de contact est supérieure à celle du fluide à confiner. Pour remplir cette condition, la force de serrage et la rugosité des surfaces doivent être convenables. Il faut en outre s'assurer qu'aucune partie du système ne soit détériorée par les forces mises en œuvre qui peuvent devenir considérables pour des orifices de grande taille à haute pression. Ces conditions amènent aux principes de conception suivants : Il convient généralement de réduire la surface du joint pour diminuer l'effort à effectuer et atteindre une pression de contact suffisante. Cette pression peut être (auto)-limitée par une faible déformation de l'une des parties qui compense les défauts de surface de l'autre de dureté supérieure. Ces déformations peuvent ou non être réversibles. La qualité de la surface est d'autant plus déterminante que la dureté des pièces en contact est élevée. Cette dureté est elle-même conditionnée par la pression maximale à atteindre. Les difficultés augmentent donc rapidement avec la pression lorsque celle-ci atteint le domaine du GPa (ordre de grandeur des résistances des métaux utilisés) et ceci d'autant plus que la taille du joint est grande. Des joints sur ce principe sont utilisables pour des diamètres de l'ordre de la dizaine de millimètres à des pressions inférieures à 1 GPa.

À haute pression, un exemple caractéristique est le montage cône / cône avec un léger écart angulaire. Le principe est illustré sur la Figure 1-A. La surface de contact initiale est (presque) nulle, la pression de contact  $y$  est donc très forte même avec une force de serrage modeste.

Une faible déformation du cône mâle normalement moins dur que la partie femelle limite la pression de contact qui est fonction de la dureté des matériaux. Celle-ci devra donc être d'autant plus grande que la pression de service sera élevée. Il faut noter que la force à exercer sur le cône est la somme de celle nécessaire à vaincre la pression (proportionnelle à la surface de l'orifice) et celle assurant le serrage du contact proprement dit proportionnelle à la surface du contact.

## 2 – 2. Joints auto-serrant

Un second type auquel est associé le nom de Bridgman est la famille très polymorphe des joints auto-serrant, qui fonctionnent sur le principe de l'aire non supportée. La géométrie de l'assemblage est telle que la pression fluide s'exerce sur la surface du joint affectée d'un certain facteur multiplicatif, déterminé par le rapport des aires supportée et totale du joint. Ce principe est le plus clairement illustré par le joint champignon ou joint Bridgman canonique illustré dans la Figure 1-C. Ce principe général est à la base du fonctionnement de la plupart des joints de haute performance d'utilisation courante. La réalisation en est toutefois très diverse en fonction des contraintes spécifiques des montages comme il est illustré plus loin.

## 3 – Joints à basse pression

Avant d'examiner les joints haute pression sensu stricto il faut dire quelques mots des joints utilisés aux pressions usuelles (inférieures à 50 MPa) des applications industrielles ou de laboratoire. Il existe de très nombreux dispositifs que l'on ne peut ici passer en revue. Une partie de la variabilité des systèmes utilisés est d'ailleurs liée à des problèmes d'ordre commercial (brevets et licences). Ceci ne signifie pas que des difficultés techniques ne puissent pas être rencontrées à basse pression, en particulier pour des joints mobiles, ou de très grande taille ou dans des environnements extrêmes (froid, chaud, chimie...). Toutefois un examen de cas particuliers révèle souvent la mise en œuvre de l'un et / ou l'autre des deux principes généraux illustrés dans les deux familles de joints décrites précédemment : (1) *réduction de la surface de contact*, et (2) *serrage augmenté par la pression du fluide confiné*.

**Joints toriques.** Dans les joints à basse et moyenne pression il convient de mentionner particulièrement la famille des joints toriques, recommandables pour leur fiabilité et leur polyvalence. Ils utilisent les deux principes précédents (Figure 1). La Figure 2A illustre leur fonctionnement. La géométrie de l'assemblage peut être très diverse. Il suffit en général de respecter les recommandations de montage des fabricants pour obtenir de bon résultats. Les manuels techniques des principaux fabricants sont aisément accessibles et leur lecture recommandée. Toutefois le point clef dans la mise en œuvre de ces joints à leurs limites extrêmes est l'emploi de systèmes *anti-extrusion* bien adaptés. Des assemblages convenables permettent de travailler au-delà de 200 MPa. Les limites à haute pression sont pour partie liées à la compressibilité de l'élastomère. Les Figures 2C à 2E décrivent deux montages typiques avec leurs particularités. Le premier, très simple (2C et 2D) permet d'obtenir un diamètre assez important à haute pression grâce à un joint delta anti extrusion. Le nettoyage en est particulièrement simple. Ce système fonctionne en routine à 100 MPa. Le second (2E) est un exemple d'assemblage de très petite taille utilisant une géométrie différente.

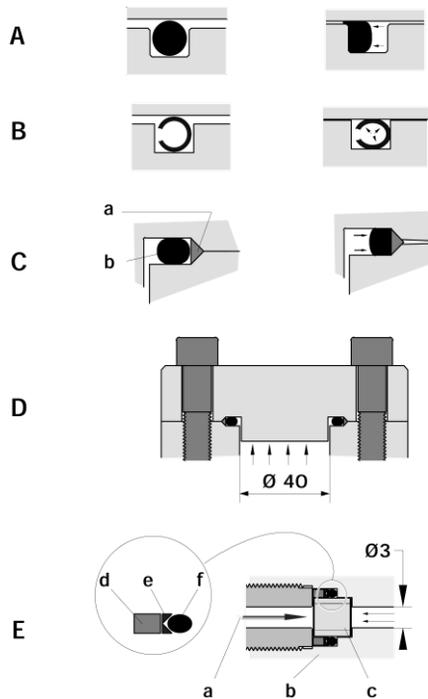


Figure 2 – (A) Joint torique polymère ; (B) Joint torique métallique (ex. licence CEA); (C) Joint torique avec anti-extrusion type delta-ring.(D) Système de fermeture d'autoclave 0.1 GPa (E) Joint avec double anti-extrusion de type bishop ring. : (a) passage des rayons X (b) corps d'autoclave (c) fenêtre en béryllium, (d) contrebague en acier dur, (e) joints anti-extrusion en laiton recuit (f) joint torique en viton. D et E sont en service au laboratoire de cristallographie à Grenoble ; cette technologie fut développée initialement à Philipps Universität Marburg et Faculty of Integrated Arts and Sciences - Hiroshima.

Notons qu'il existe des alternatives aux joints toriques telles que les joints en U dont un exemple d'utilisation est donné plus loin (Figure7). Plusieurs élastomères sont disponibles, à choisir en fonction de l'environnement de travail. Il existe également des joints toriques métalliques constitués d'un ressort chemisé *hélicoflex* (2B) qui fonctionnent dans des environnements particulièrement hostiles (température, fluides agressifs...). Leur mise en œuvre artisanale n'a pas toujours été un succès.

## 4 – Joints cône sur cône

Le second type de joint qui intervient de façon ubiquiste dans toute installation haute pression est le raccord cône par cône évoqué dans les généralités. Ils conviennent particulièrement pour des petits diamètres. La mise en œuvre pour des grosses sections est difficile car l'étanchéité y est assurée par un serrage contre les forces de pression qui augmentent avec la taille du système et rendent difficile le réglage du serrage sans déformation destructive des portées de joint.

#### 4 – 1. Raccords de tuyauterie pour haute pression

L'application type concerne la réalisation de raccords entre des tubes et des composants (jonctions T, L, dérivations, vannes, etc.) d'un système. Dans ce cas, le tube est moins dur que la pièce à laquelle il s'adapte. L'écart angulaire typique entre les deux cônes est de 1 à 2 degrés (voir Figure 3). Le contact initial se fait donc sur une ligne. Le cône mâle se déforme légèrement au serrage (faible écart angulaire entre les parties mâle et femelle) assurant une surface de contact réduite en surpression par rapport au fluide, ce qui assure l'étanchéité.

Il existe chez les constructeurs plusieurs gammes de tubulures et de raccords fonctionnant sur ce principe jusqu'à 1 GPa (voir Figure 3). Le tube constitue le cône mâle, un filetage gauche reçoit une bague qui sert d'appui à la noix de serrage qui se visse (pas de vis droit) dans le corps de la pièce qui héberge le cône femelle. Ce système est simple et efficace. Du fait du principe du fonctionnement il convient de limiter la force de serrage, faute de quoi le cône mâle sera déformé plus que nécessaire, cette situation s'aggravant à chaque démontage jusqu'à destruction du joint. L'utilisation de clefs dynamométriques est une solution possible.

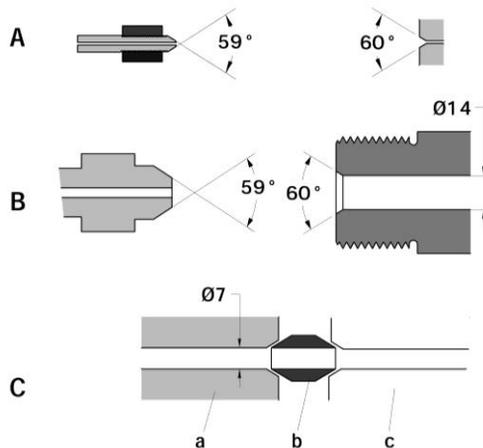


Figure 3 –. (A) Raccord de tuyauterie haute pression; (B) Fermeture d'autoclave fonctionnant à 0.2 GPa, fermeture froide ; utilisé au laboratoire de Cristallographie de Grenoble. (C) Jonction olive (b) double cône sur cône, qui permet le passage sans variation de diamètre entre deux parties (a) chaude, (c) froide (chambre de trempe) sans diminution de diamètre intérieur ; utilisé au CRSCM à Orléans.

La Figure 4 indique les précautions essentielles d'utilisation et certaines erreurs à éviter. Le point principal est de s'assurer que la bague d'appui est dans une position correcte. Celle-ci ne doit en aucun cas aller en butée avec le corps de la pièce. Le pas de vis gauche utilisé pour la bague lui évite d'avancer au serrage de la noix. Les raccords utilisés à des pressions inférieures à 400 MPa peuvent normalement être démontés de nombreuses fois, y compris la bague, ce qui permet de refaçonner le cône sans trop raccourcir le tube si on a utilisé des couples de serrage appropriés. Pour les cônes utilisés au-dessus de 700 MPa, cette condition est presque impossible à remplir. Il convient alors, pour rénover une jonction cône sur cône, de couper le tube en amont de la bague, de refaire le pas de vis gauche et le cône. Le raccourcissement doit être prévu dans la conception initiale (tubes de longueur suffisante,

montage flexible). La réalisation et l'entretien des raccords sont facilités par l'existence d'outils manuels simples qui permettent de rénover les portées coniques et les embouts.

Parmi les pannes difficiles à détecter, il peut arriver que l'assise conique d'une pièce (obturateur etc.) soit fissurée au niveau du cône et dans ce cas, il est impossible de refaire l'étanchéité. Ceci peut intervenir en cas de serrage exagéré ou de défaut de conception (matériau...) de la pièce à raccorder. Une deuxième source de problèmes insidieux est le raccord avec des courtes sections rigides. Il faut s'assurer que la raideur du montage n'interdit pas le serrage correct des joints. Il faudra partiellement libérer les pièces de jonction (T L etc.) pour permettre la mise en place des joints.

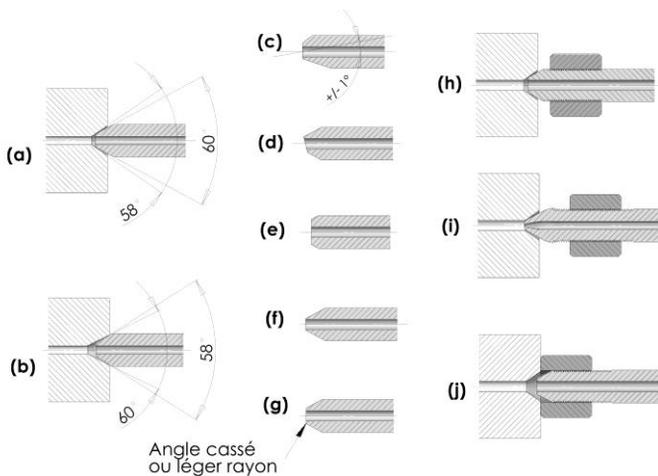


Figure 4 – Exemples d'erreurs de fabrication ou de montage des raccords cône sur cône de tube à haute pression (d'après Spain et Paauwe, 1977). Fabrication: (a) correct, (b) valeurs des angles permutées, (c) axe du cône non parallèle à l'axe du tube (d) le tube n'est pas coupé à angle droit (e) cône trop court (f) cône trop long, (g) correct, angle vif ou un rayon à l'endroit indiqué. Montage: (h) correct (i) pas de vis trop long et bague trop reculée, (j) bague trop avancée, pas de contact entre le tube et l'assise.

## 4 – 2. Autres connexions cône sur cône

Cette technique, attractive par sa simplicité peut être utilisée pour des diamètres supérieurs à ceux des tubes haute pression et d'autres éléments. Pour le domaine inférieur à 400 MPa, on peut atteindre assez aisément des diamètres de section de 15 à 20 mm. L'assemblage réalisé doit permettre d'appliquer une pression de contact convenable sur la portée de joint en plus de la force créée par la pression hydrostatique à confiner. Le dispositif de serrage doit permettre le bon alignement des pièces et éviter la rotation de l'une par rapport à l'autre lors du serrage.

Une utilisation usuelle est la fermeture (avec une entrée de pression) des réacteurs à joint froid. La nature de l'alliage du corps du réacteur est déterminée par les conditions d'utilisation de la partie chaude (température et pression). La partie mâle de l'assemblage doit avoir une

dureté inférieure pour éviter les déformations du corps de la bombe. Bien que l'on parle de joint froid, la température dans ce type d'appareil peut atteindre quelques centaines de degrés au niveau du joint, ce qui dégrade les propriétés mécaniques. Il est fréquent de voir des déformations importantes. Le réglage du couple de serrage est rendu difficile par les frottements dans les pas de vis. Le raccord entre deux parties volumineuses d'un système peut être réalisé à l'aide d'une olive intermédiaire, comme représenté Figure 3C, qui permet de maintenir un diamètre intérieur continu (par exemple 7 mm) entre la partie chaude d'une enceinte et la partie froide.

### 4 – 3. Vannes d'isolement

L'élément clef dans le fonctionnement d'une vanne d'isolement est le joint entre le pointeau et l'assise, généralement réalisé à l'aide d'un contact cône sur cône particulier. Pour cette raison, on aborde ici cet élément critique des installations. Ce sera aussi l'occasion d'une digression concernant d'autres aspects d'ordre général: le joint mobile et la détection des fuites particulièrement utile pour cette partie d'un système haute pression fluide. Notons tout d'abord qu'il faut en général obtenir une étanchéité convenable mais pas absolue du joint mobile autour du pointeau, mais en revanche des joints parfaits du pointeau sur son assise et des connexions d'entrée et de sortie de la vanne. Ceci conduit à transgresser le premier principe de fonctionnement énoncé dans les généralités, en ne minimisant pas la surface de contact initial mais au contraire en la calculant pour éviter de trop fortes déformations à l'assise de pointeau. Ceci a pour contrepartie la nécessité d'assurer un état de surface de très bonne qualité pour avoir l'étanchéité. Un dysfonctionnement particulièrement difficile à détecter est, après quelques utilisations à très haute pression (autour de 1 GPa) la détérioration de l'état de surface du pointeau par effet de cavitation du gaz s'échappant très brutalement dans l'espace restreint du joint, sous un très fort gradient local de pression. Ce problème ne se pose que pour des fonctionnements au-dessus de 600 MPa. Les vannes commerciales sont fiables et robustes dans la gamme 0-400 MPa et avec un peu plus de soin jusqu'à 700 MPa. Dans la mesure du possible, il est recommandable d'éviter les échappements violents de gaz susceptibles d'endommager les portées de pointeau, en particulier si le fluide est susceptible d'être pollué par des matériaux durs (céramique, etc.). La réalisation de vannes pose également le problème des joints mobiles autour du pointeau (presse-étoupe) à réaliser dans un espace restreint. Ce problème est simplifié du fait que, contrairement aux autres parties d'un système, une étanchéité absolue n'est pas requise ici. En revanche, la fermeture au pointeau doit être parfaite et fiable. Il faut à ce propos remarquer qu'il est très difficile de détecter directement une petite fuite à cet endroit assez vulnérable. La seule solution pratique pour voir directement une fuite est de déconnecter la partie amont de la vanne du système intensificateur et, alors qu'elle est sous pression, d'utiliser l'eau savonneuse sur l'entrée ainsi temporairement déconnectée. Cette opération est potentiellement dangereuse. Une solution moins directe est de remplacer l'appareil pressurisé par un bouchon suffisamment fiable et de voir si l'étanchéité peut être obtenue sur le circuit réduit à la vanne seule.

## 5 – Joints Bridgman *champignon*

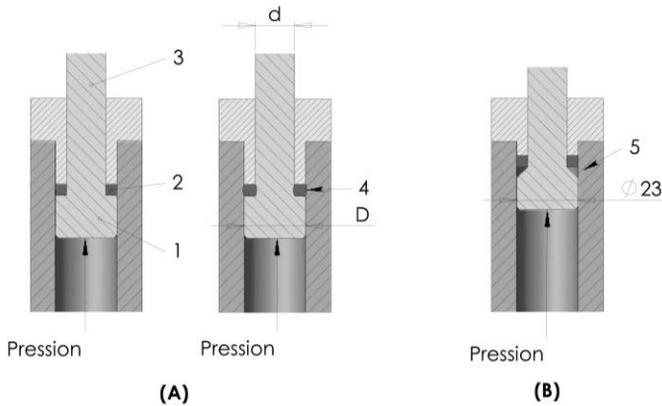


Figure 5 – (A) Principe de fonctionnement du joint Bridgman. La tête du champignon (1) de diamètre  $D$  est soumise à la pression du fluide. La queue (3) de diamètre  $d$  inférieur est à 1 atmosphère, la surface correspondante est appelée aire non supportée. La force qui s'exerce sur le piston (champignon) est entièrement appliquée sur la faible surface supportée du joint (2). La multiplication de pression dans le joint est fonction du rapport des diamètres. Si ce facteur est trop grand, on pourra craindre des déformations du piston et de l'enceinte en (4). (B) Exemple de joint dérivé de ce modèle utilisé à haute température (jusqu'à 800°C) avec des joints métalliques. Noter la portée conique du joint qui facilite l'étanchéité initiale. Le piston fileté dans sa partie haute (non figurée) est serré initialement à l'aide d'un écrou.

Il s'agit du dispositif le plus simple et efficace utilisant le principe de l'aire non supportée (voir Figure 5). Il est utilisé avec succès dans des tailles et des conditions de température et de pression très larges. Ses limites de fonctionnement sont liées à son principe. Le facteur d'amplification de pression peut devenir trop grand si l'on doit conserver une surface de la section non supportée (la queue du champignon) suffisante pour l'instrumentation. A titre indicatif, pour un rapport diamètre de la partie non supportée ( $d$ ) / diamètre total du joint ( $D$ ) compris entre 0,5 et 0,75, le facteur multiplicatif varie entre 1,3 et 2,3. Ces valeurs sont représentatives de cas réels d'utilisation.

### 5 – 1. Obturateurs simples

La nature de la garniture du joint et sa géométrie dépendent des conditions de service. Un exemple caractéristique est un obturateur utilisé en routine à 400 MPa, représenté sur la Figure 6F. Le joint est un sandwich Téflon-caoutchouc-Téflon, un facteur de serrage de 1.3 est suffisant ( $d/D=0.5$ ), qui laisse une bonne marge de sécurité à 400 ou 500 MPa pour éviter toute surpression destructive sur le champignon ou le corps de l'autoclave. De même qu'avec les joints toriques, on peut utiliser le Téflon pour servir d'anti-extrusion au joint de caoutchouc. Des bagues d'appui en bronze destinées initialement à compenser le large rayon de courbure au raccord de la queue et de la tête du champignon (qui évite les angles vifs intérieurs) ont été trouvés inutiles et supprimées à l'usage. Un point important est d'avoir un bon ajustement de la bague d'appui (f) avec le corps de l'enceinte (b) et la queue du champignon (c). Les joints

sont découpés à l'emporte pièce à partir de feuilles d'épaisseur 1 à 3 mm. La mise en place et l'extraction se font sans difficulté. Il faut remarquer la simplicité du dessin du champignon où ne figure pas de dispositif particulier d'extraction. Celle-ci s'effectue en dévissant la culasse et en laissant dans l'enceinte une pression résiduelle de quelques bars. Ceci permet de faire un obturateur de faible longueur qui facilite les perçages de petit diamètre nécessaires pour les passages d'électrodes (a).

## 5 – 2. Obturateurs chauds

Il est possible de réaliser des joints de Bridgman fonctionnant jusqu'à 800°C. Un exemple est donné sur la Figure 5B. On doit dans ce cas utiliser des garnitures en métal malléable, tel que le cuivre recuit. L'étanchéité initiale du joint est plus difficile à obtenir qu'avec les élastomères. Cette difficulté est résolue en augmentant l'aire non supportée et donc le facteur multiplicatif du joint (valeur 2 à 2.5). La seconde modification par rapport au premier montage consiste à utiliser une *portée conique* pour réduire la surface de contact initiale entre le piston et le joint et qui permet de dilater ce dernier lors du serrage initial pour faire l'étanchéité avec la paroi de l'enceinte. Ce joint étant utilisé à chaud et le facteur de serrage étant important, la pression maximale d'utilisation est réduite et dépend de la température effective et de la nature des métaux utilisés. Des enceintes de grand volume à joints tièdes (200-300°C) travaillent en routine jusqu'à 300 MPa pendant des mois. Un problème d'utilisation fréquent est lié à la difficulté de réalisation d'un serrage initial correct si le pas de vis est un peu déformé, ou si il y a trop de jeu entre le piston, le joint et l'autoclave ou enfin si le joint de cuivre n'a pas été convenablement recuit. En fonctionnement normal, après mise sous pression, le piston recule du fait de la mise en place du joint et le boulon doit tourner librement. Les seuls efforts soutenus par le piston sont au niveau du joint. En revanche avec un serrage excessif, de fortes contraintes restent appliquées sur le pas de vis du piston qui va se déformer irréversiblement, d'autant plus que la température à cet endroit est élevée. La mise en service devient de plus en plus difficile jusqu'à destruction du piston. D'autres métaux malléables comme l'argent peuvent être utilisés avec succès. La Figure 6C représente le dispositif de fermeture d'un autoclave de grand volume chemisé en argent équipé d'un séparateur simple à réaliser entre le système de pressurisation et les solutions utilisées dans le réacteur (cet appareil a fonctionné en routine chez B. Ferrand - LETI CEA Grenoble).

## 5 – 3. Variantes hybrides

Dans certains montages, la géométrie générale de type champignon est conservée, et donc le fonctionnement sur le principe de l'aire non supportée, mais le serrage est utilisé pour réaliser une étanchéité entre des portées coniques entre le corps de l'enceinte et la culasse. Des appareils commercialisés fonctionnent avec un dessin tel que celui de la Figure 6D (Autoclave Engineers). L'avantage de ce système est qu'il n'y a pas de garniture de joint à remplacer et pas de risque de détérioration du corps ou du piston s'ils sont convenablement appariés avec la bague d'appui qui réalise le joint. Il est clair qu'une assez bonne qualité des surfaces est nécessaire. Le principe de minimisation des aires de portée de joint doit aussi s'appliquer dans ce cas. Les pressions de contact dépendent des sections relatives de la tête et de la queue du piston mais aussi de l'angle de la portée.

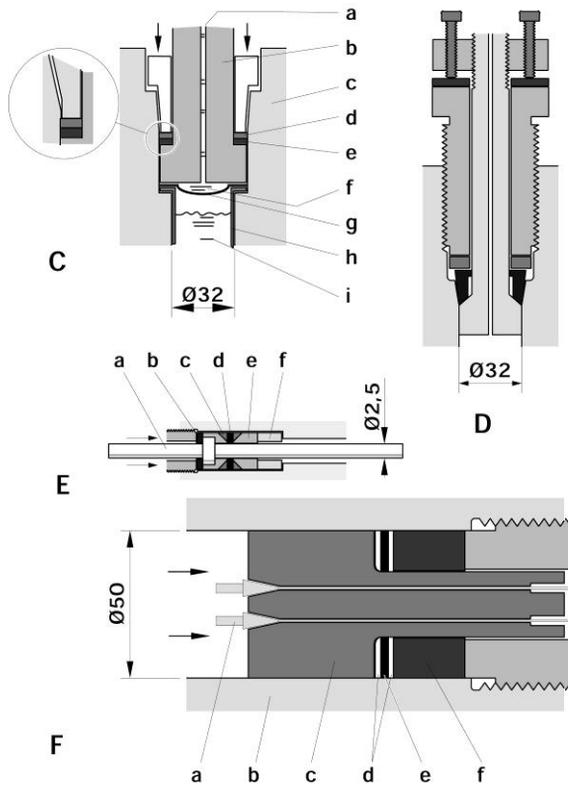


Figure.6.– (C) Autoclave 0,2 GPa, 800°C chemisé en argent (LETI-CEA, Grenoble) ; (D) Système de fermeture type Autoclave Engineers ; (E) passage de courant 15A (labo. cristallographie{\* Grenoble) (a) conducteur 316L, (b) contre bague en acier dur, (c) joints anti-extrusion bishop ring, (d) joint Viton ou Téflon, (e) garniture en Celeron (f) contrebague acier dur ; (F) Joints d'autoclaves à chauffage interne (CRSCM-Orléans), 1GPa (a) passage de fils (b) corps, (c) champignon, (d) joints Téflon, (e) joint de caoutchouc (f) contre bague. {\*technologie développée initialement à Philipps Universität Marburg et Faculty of Integrated Arts and Sciences – Hiroshima.

## 5 – 4. Passages isolés

Les obturateurs de type champignon peuvent être miniaturisés. C'est le cas du passage d'électrode représenté Figure 6<sup>E</sup>, utilisé à 0,1 Gpa et qui fonctionne sur le même principe. La réalisation en est compliquée par la nécessité de maintenir un isolement électrique entre le corps de l'appareil et l'électrode. Ce dessin se rapproche de la Figure 12 de l'ouvrage de Bridgman. Il en existe de nombreuses variantes. Il faut signaler que des extrusions violentes de montages de cette famille peuvent arriver pour différentes raisons et qu'il convient de prendre les précautions adaptées.

## 6 – Joints annulaires auto-serrés

Pour repousser les limites du joint de Bridgman *champignon*, on peut utiliser un joint annulaire qui fonctionne aussi sur le principe de l'aire non supportée. La grande variété de montages de ce type décrits dans la littérature est une indication des difficultés rencontrées. La géométrie et le fonctionnement non hydrostatique de ces joints les rendent plus délicats à concevoir. On cherche à obtenir une meilleure fiabilité aux limites de fonctionnement du montage champignon, en particulier à éviter les risques de sectionnement de la queue du champignon et à accroître l'aire utile pour les passages instrumentaux. La topologie de ce type de joint est donnée Figure 7. Le joint déformable repose sur une portée conique. Le taux de serrage est déterminé par la pente du cône et l'évolution de la géométrie du joint dans le temps. La pression dans le joint ne peut plus comme dans les cas simples précédents être considérée hydrostatique. On choisit en général un joint de dureté inférieure à celles de l'enceinte et du bouchon pour éviter des déformations irréversibles. Il faut en outre prévoir un dispositif d'extraction. On distingue ici, trois familles de joints dont les fonctionnements différents par l'angle et l'importance des déformations plastiques subies par le joint. Le point commun pour la plupart des montages est que l'étanchéité se perd dès que ce dernier arrive en butée et que l'effet d'aire non supportée disparaît.

### 6 – 1. Joints plastiques de faible angle

Ce type de joint (dont une réalisation est décrite en détail par Paureau 1975) se caractérise par un angle faible de la portée et des joints annulaires minces et déformables. La mise en place initiale est effectuée par serrage contre un épaulement dans le corps de l'enceinte pour obtenir une première déformation et étanchéité du joint, avec ou sans l'assistance d'un premier étage à base de joint torique. Du fait de l'angle choisi ( $<10^\circ$ ), et de la forme du joint, l'aire non supportée est très forte, la pression va donc déformer le joint, son recul étant limité par les frottements.

Plusieurs variantes sont utilisées pour des tailles très diverses et donnent satisfaction jusqu'à des pressions élevées (1.5 Gpa). Parmi les aléas observés, l'un est lié à la faible épaisseur du joint par rapport au diamètre (par exemple  $e=0.9\text{mm}$ ,  $l=4\text{mm}$  pour un diamètre de 35mm). Il arrive que le joint perde son axe de symétrie subissant une déformation irrégulière à différents endroits du périmètre. Pour pallier ce problème, Paureau a introduit une rupture de pente sur l'obturateur, que le joint atteint après une certaine déformation et qui stabilise sa forme à plus haute pression. Toutefois plusieurs systèmes fonctionnent convenablement sans ce dispositif.

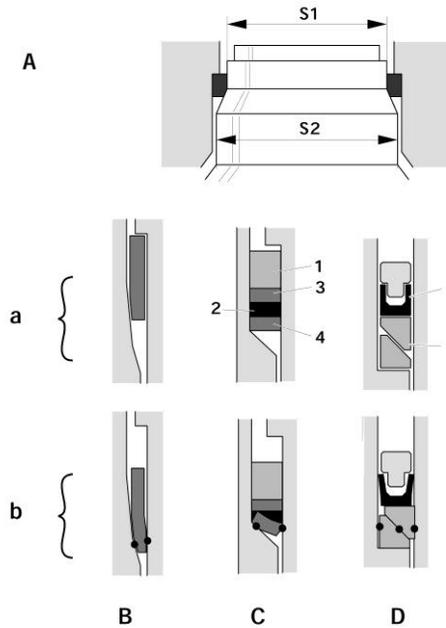


Figure 7.– **Joint annulaires auto-serrés (A) Principe de fonctionnement (B) Joints plastiques à faible angle (C) angle moyen type Newhall (version adaptée au CRSCM à 1 GPa) (1) Teflon-torique –teflon ; (2) plomb ; (3) acier dur ; (4) acier étamé. (D) Joints élastiques à deux bagues. (a) avant, (b) après mise sous pression.**

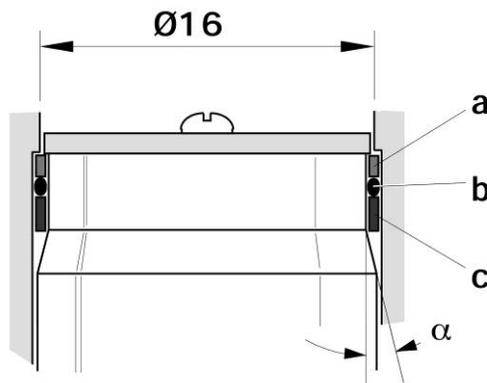


Figure 8 – Cellule gaz 0,5 GPa, travaillant de 1,5 à 300 K, utilisée à l'ILL-Grenoble ; Le corps est en Fortal, le champignon en cuivre-béryllium ; l'angle  $\alpha$  vaut environ  $5^\circ$  ; (a) pièce d'extraction, (b) joint torique basse pression en polymère, (c) joint de cuivre recuit recouvert d'indium à faible coefficient de frottement.

Un autre exemple est décrit dans la Figure 8. Il est réalisé avec des matériaux transparents aux rayonnements utilisés et travaille à très basse température. Les joints sont généralement cadmiés (ou munis d'un autre revêtement tel que l'indium) pour réduire les coefficients de frottement. La réalisation de l'étanchéité initiale s'obtient plus facilement avec des angles vifs (P. Boivin). Ce type de joint peut éventuellement subir plusieurs cycles de pression. Il présente comme autre avantage l'économie de fabrication grâce aux formes simples des joints et à un état de surface non critique. Il ne peut fonctionner que de façon statique.

## 6 – 2. Joints plastiques-élastiques d'angle moyen

Un modèle qui donne également satisfaction tout en étant relativement simple est représenté sur la Figure 7C. Le principe est analogue, toutefois l'angle d'appui est plus grand ( $45^\circ$ ) la première étanchéité intervient à plus haute pression. Le joint est donc réalisé en deux parties: une partie basse pression schématisée en (1) sur la figure, constituée d'un joint torique entre deux joints anti-extrusion de Téflon (non détaillée sur la figure). Cette partie fonctionne jusqu'à 100 ou 200 MPa, pression à partir de laquelle le second étage du joint (2,3,4) prend le relais. La clef du bon fonctionnement réside dans le choix de l'épaisseur du joint d'acier étamé (4) qui se déforme, et du joint de plomb (3) qui permet cette déformation suivant le schéma de la partie (b) de la figure. Ce système donne satisfaction jusqu'à 1 GPa, mais ne peut pas subir plusieurs cycles de pressurisation et semble plus délicat à mettre en œuvre que le premier. L'usage des joints est comme dans le premier cas non critique et particulièrement simple et peu onéreux.

## 6 – 3. Joints élastiques à deux bagues

Ce type de joint (Figure 7D) a été mis au point pour des systèmes performants d'extrusion sous haute pression (H. Massat). Le joint est constitué de 3 parties: un joint basse pression (ici en U), une bague et une contre-bague dont la géométrie est calculée pour que l'amplification de pression soit suffisante pour assurer l'étanchéité mais que l'ensemble du système travaille dans le domaine de comportement élastique. Cette condition permet de calculer le comportement du joint et ainsi d'en optimiser les performances. La qualité de la géométrie et les états de surface doivent être soignés. Ce système s'est révélé particulièrement fiable dans les appareils où il est employé. La conception et la réalisation requièrent une assez grande technicité. Ils sont en service au LIMHP-CNRS (Villetaneuse) jusqu'à 2 GPa et ont fait l'objet d'un brevet (Massat 1971, 71-10702).

## 7 – Joints coniques d'Amagat

Cette famille de joints fait partie des plus anciennes. Le schéma de la Figure 9A, inspirée de la Figure 12 de l'ouvrage de Bridgman, reproduit un dessin d'Amagat utilisé à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle pour faire des passages électriques isolés. Ce concept a été depuis réutilisé et adapté à de nombreuses reprises et peut être employé pour d'autres usages. Depuis les travaux des pionniers, des progrès ont été réalisés sur la qualité des garnitures isolantes utilisées: polycarbonates ou composites à base de résines époxy, qui n'étaient pas disponibles à cette époque en lieu et place de l'ivoire ou de l'os de l'oreille interne d'un cétacé.

Le fonctionnement du joint repose encore sur un mécanisme d'auto-serrage du fait d'une aire non supportée. Pour une longueur donnée ce serrage est d'autant plus grand que l'angle au sommet du cône est faible. D'assez nombreux essais ont permis de converger vers des valeurs

optimales voisines de  $15^\circ$  qui permettent d'obtenir assez facilement l'étanchéité tout en restant démontables. Une grande variété de passages peut être ainsi réalisée.

La Figure 9D montre 3 variantes : (a) un passage de thermocouple gainé, brasé à l'argent dans un cône d'acier, le joint étant réalisé à l'aide d'une couche de polycarbonate ou d'époxy (b) des passages de fils de cuivre minces isolés dans le corps du joint de plastique et (c) une électrode de puissance. La mise en place est réalisée avec un léger choc. Il arrive qu'il soit nécessaire de répéter cette opération si l'on détecte une fuite à la mise en pression. On utilise le même principe pour des entrées de pression avec un capillaire brasé de même géométrie que (a). La Figure 9C représente une électrode sur le même principe, mais munie d'un système de serrage isolé pour assurer la première étanchéité. Ces dispositifs donnent satisfaction et sont assez faciles à réaliser, bien qu'un certain soin dans l'usinage des cônes soit nécessaire (valeur précise de l'angle et bon état de surface). Une méthode plus robuste est représentée dans la Figure 9B. On utilise une technique d'extrusion contrôlée pour fabriquer simultanément un cône et un (ou plusieurs) passages de fils isolés par de la magnésie dans une gaine métallique (Brevets 75-18827 et 77-06470 H.C. Massat, Bastide J.P., Léger J.M.).

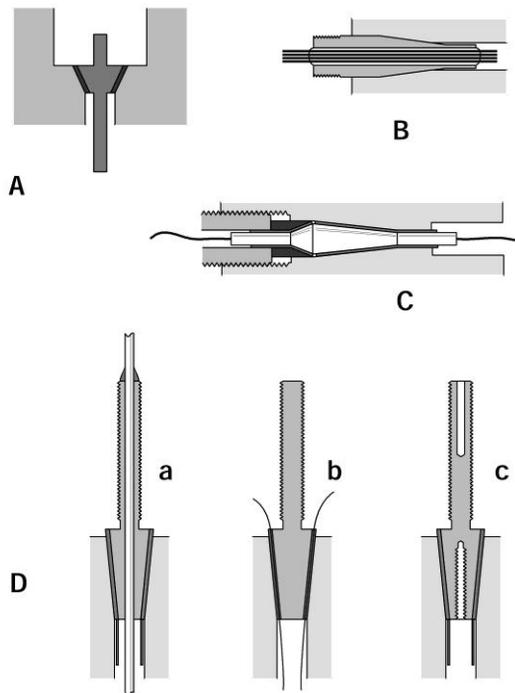


Figure 9. Joints coniques de type Amagat. (A) dessin original d'après Bridgman. (B) passages coniques extrudés d'électrodes de mesure ou de puissance isolées (brevets CNRS, Massat, Bastide, Léger). (C) Passages de fils électrodes appareil Basset ; (D) Variante simplifiée - proche du dessin original d'Amagat- utilisés au CRSCM pour presque tous les types de passages : (a) couples ou fils gainés ou capillaire HP, (b) passages de fils dans un cône d'époxy (c) électrodes de puissance.

## 8 – Autres joints

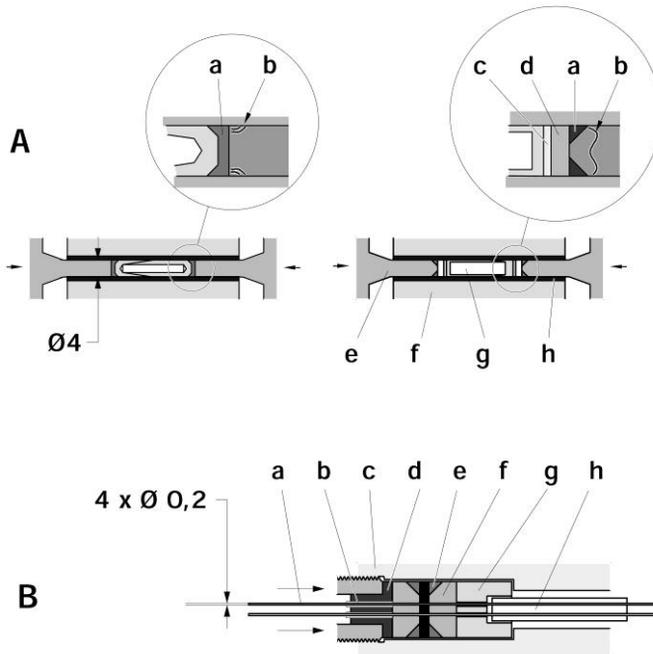


Figure 10 – (A) Clamp haute pression 3GPa - 4,2K – (Laboratoire du Magnétisme, SNCI et ILL Grenoble); a) Joint anti-extrusion en Cuivre-Béryllium indié , b) lieu des cassures aux limites supérieures de pression, c) Joint en Cadmium, d) Joint en Cuivre-Béryllium, e) Piston en Carbure de tungstène, f) Corps en alumine frettée, g) Capsule étanche, h) Gaine métallique. (B) Passage de fils (Laboratoire de Cristallographie, Grenoble); a) conducteurs, b) Gaine alumine, c) Autoclave, d) Contre bague en acier dur, e) Joint anti extrusion en laiton recuit, f) Garniture en Celeron, g) Contre bagues en acier dur, h) Perle quadrifilaire en alumine. [La technologie fut développée initialement à Philipps Universität Marburg et Faculty of Integrated Arts and Sciences – Hiroshima].

Les systèmes présentés ont été choisis pour leur simplicité, leur polyvalence et l'expérience pratique des auteurs. Ils illustrent des fonctionnements relativement purs reposant sur la réduction des aires de contact et l'auto-serrage par aire non supportée. La réalisation de fenêtres en saphir (traité en détail par J.-C. Chervin) est un cas limite qui illustre le principe suivant lequel, plus les surfaces en contact sont dures par rapport à la pression nécessaire, plus l'état de surface est critique. Dans le cas de saphir / acier, un poli optique de très grande qualité permet d'obtenir l'étanchéité à plusieurs centaines de MPa. Il existe cependant une grande diversité dans la façon de répartir les contraintes et les déformations dans les éléments constitutifs d'un assemblage haute pression. De nombreux systèmes font appel aux forces de frottement notamment pour les enceintes de petit volume aux très hautes pressions. Ces types de joints n'ont été que partiellement abordés dans cette revue. Un exemple caractéristique est l'utilisation de poudres compactées (rendues étanches par imprégnation) ou de passages filaires dans une résine (Figure 10B). La Figure 10A représente deux petites cellules qui

gènèrent une pression hydrostatique pouvant atteindre 3 GPa utilisées pour des expériences de diffraction sous rayonnement X ou de neutrons. Il s'agit d'un système piston-cylindre verrouillé (clamp). Un dispositif associé applique une force mécanique sur les pistons en acier ou en carbure de tungstène du clamp par l'intermédiaire d'un équipement élastique. Le déplacement des pistons comprime un liquide contenu au sein d'une capsule étanche dans lequel sont enfermés l'échantillon étudié et un élément permettant une mesure de pression au moyen du rayonnement. L'équipement maintenu sous contraintes est introduit dans un cryostat. Le corps du clamp est réalisé dans un matériau transparent aux rayonnements, et partiellement fretté par emmanchement conique à ses deux extrémités de manière à laisser l'espace central libre au passage du faisceau.

Enfin, pour terminer notre revue des types de joints et de montages, nous présenterons deux cas particuliers, celui des joints pour cellules à enclumes de diamant d'une part, et celui d'un nouveau type de vanne à très haute pression, d'autre part.

## 8 – 1. Le joint pour cellule à enclumes de diamant

**Fonction.** Il a deux fonctions:

- Il délimite le volume expérimental.
- La matière du joint fournit un support latéral aux faces du pavillon. C'est la fonction première des enclumes à double pente.

Le joint est préparé dans une feuille de 100 à 250  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. Il est préindenté entre les deux enclumes, à une épaisseur de 10 à 50  $\mu\text{m}$ .

Le trou est percé au centre de l'empreinte avec une microperceuse, par électroérosion ou par un faisceau laser. Il est replacé dans la même position entre les enclumes (nécessité d'un repaire).

Quand le joint est serré entre les enclumes son épaisseur décroît jusqu'à quelques  $\mu\text{m}$  à 100 GPa. La stabilité du montage dépend :

- Du diamètre du trou et de la culasse.
- Du centrage du trou par rapport à la culasse.
- De la compressibilité relative du joint et du milieu transmetteur de pression ainsi que de l'échantillon.

De la nature du joint.

Il n'existe pas de règle générale mais on peut noter sous l'effet des forces exercées :

- Le diamètre du trou diminuera pour un milieu transmetteur et un échantillon compressible. Dans le cas extrême d'un trou vide il se refermera.
- Par contre pour un milieu transmetteur et un échantillon très incompressible le diamètre augmentera puisque la diminution d'épaisseur doit être compensée par une augmentation de diamètre
- Il faut éviter que le diamètre du trou devienne équivalent au diamètre de la culasse (risque de rupture).
- Il est toujours avantageux d'utiliser un trou ayant le plus petit diamètre en évitant que l'échantillon touche les bords du trou. Un petit trou perturbe faiblement le joint, augmente la surface de frottement et un joint sans trou est évidemment stable.

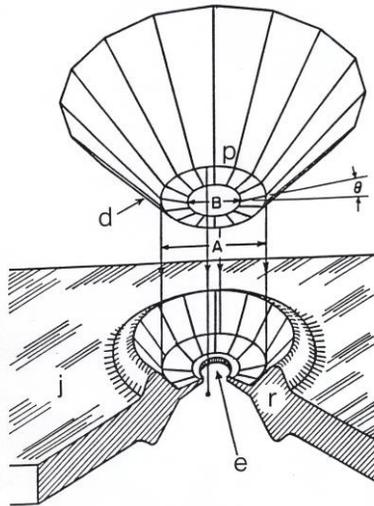


Figure 11 – Joint emprunté par une enclume à double face [Mao, 1979]

*d* : diamant

*A* : diamètre de la culasse : 100 à 400  $\mu\text{m}$

*B* : diamètre de la partie plane : 30 à 150  $\mu\text{m}$

$\theta$  : angle du biseau 4 à 10°

*j* : joint

*r* : renflement

**Nature.** Les joints en acier inoxydable sont les plus couramment utilisés. On part de feuillets de 200  $\mu\text{m}$  d'épaisseur généralement dans la nuance Z12 CN18-08 (type AISI 301). Leur composition est d'environ 0.15% de carbone, 16-18 % de chrome et 6-8 % de nickel. On les utilise sous forme de cylindres, de carrés ou de triangles suivant le conditionnement souhaité.

-Ils peuvent aussi être en inconel super alliage nickel-chrome (par exemple Inconel 600 : 72 % Ni, 8 % Fe et 16% de Cr) plus mou que l'inox. L'inconel X750 : 74% Ni, 7% Fe et 15% de Cr est pourvu d'une exceptionnelle résistance à la corrosion et possède donc un excellent comportement aux hautes températures.

Les autres matériaux utilisés comprennent le cuivre béryllium (CuBe) dans la nuance la plus résistante ST25 (1,8 à 2% de Be et 0,2 à 0,3 % de Co) qui, dans certains cas, est utilisé trempé avec une dureté de 42 HRC.

On aura recours au tungstène lorsque l'on veut travailler à haute température mais sa fragilité et la difficulté d'usinage font que son emploi est très spécifique.

On pourra enfin le choisir, soit en rhénium, produit que l'on préfère pour obtenir des joints pouvant travailler couramment jusqu'à 100 Gpa, sa mise en œuvre nécessitant beaucoup de précautions, soit en plastique (teflon, plastidur, mylar, hostalen-gür) s'il ne doit être utilisé que dans un domaine de pression plus restreint (environ 2 GPa).

## 8 – 2. Un exemple de réalisation : vanne à très haute pression

Dans la première partie (voir § 4-3), on a présenté un ensemble de problèmes qui se posent dans le fonctionnement des vannes de haute pression. Il s'agit souvent d'un composant critique d'une installation haute pression. Cette discussion a servi de base à la conception d'une vanne qui évite ces difficultés en réalisant différents compromis. Le problème principal découle du principe de fonctionnement de la vanne classique : déplacement du pointeau *contre la pression et frictions au niveau du presse-étoupe* qui ont pour conséquence un contrôle de moins en moins précis de la force de serrage avec l'accroissement de la pression de service. Le principe retenu (Figure 12) élimine totalement ces problèmes. Il consiste à déplacer le pointeau, non pas par un mouvement au travers de la paroi frontière entre pression ambiante et haute pression, mais par déformation de l'ensemble étanche corps de vanne-pointeau, dans le domaine élastique des matériaux, pour contrôler l'ouverture de la vanne en (2). La pression d'huile (0 à 300 bars) dans la chambre (5) rendue solidaire du corps et étanche avec des joints toriques (3), permet d'allonger le corps de quelques 1/10 de mm et ainsi de faire reculer le pointeau. Une olive (7) en bronze réalise simultanément l'étanchéité et la solidarisation du pointeau et du corps à cet endroit. Pour pouvoir obtenir la précision dimensionnelle sur la longueur et l'étanchéité en (2) et (6), le pointeau est en carbure de tungstène (module d'élasticité). Il faut aussi utiliser en (2) une portée non pas conique comme il est d'usage (et dont les avantages ont été exposés précédemment) mais plat sur plat. Ce choix de matériaux et de géométrie est le résultat d'expérimentations et semble également favorable pour des vannes de conception classique (G. Hamel), bien qu'il transgresse l'un des deux principes mis en avant au début de ce chapitre : minimisation de la surface de contact. En contre-partie, la dureté du matériau implique un polissage des surfaces de contact en (2) du pointeau et de l'assise. Ceci est facilité par la planéité et l'orthogonalité à l'axe de symétrie des surfaces concernées.

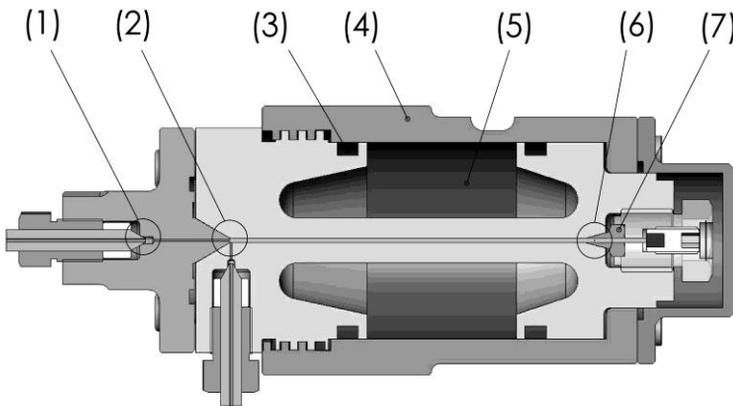


Figure 12 – Vanne à très haute pression : (1) Raccord Type Harwood série 3M (diamètre de canalisation 4,76), (2) Couple assise/pointeau (3) Joint torique (4) Enveloppe (5) Huile - 0/300bars (6) Point de liaison pointeau/corps de vanne (7) Joint d'étanchéité et de liaison mécanique. Cet appareil a été réalisé dans le cadre du Réseau Hautes Pressions - Brevet CNRS N°04 005515

Il faut noter que la réalisation de cet ensemble a comporté, après essais sur des montages simplifiés des joints spéciaux, une validation par simulation numérique (éléments finis) réalisée par un bureau d'études spécialisé. Du fait du principe de fonctionnement sans frottements, le contrôle de position par un dispositif hydraulique est très précis et il est possible de réaliser des ouvertures ou fermetures très progressives, voire de les automatiser pour contrôler une micro-fuite. Ceci présente en outre l'avantage de limiter les risques, évoqués précédemment, de détérioration par ouverture brutale mal contrôlée à haute pression. Les dimensions réduites de la vanne ont permis de réaliser une étanchéité par la méthode cône sur cône entre l'assise du pointeau et le corps de vanne en (2). Le nombre de pièce est très petit, le démontage et l'assemblage rapide. La réalisation mécanique doit être soignée mais les pièces critiques sont peu onéreuse et l'ensemble d'un coût compétitif par rapport aux vannes conventionnelles jusqu'à sept fois plus lourdes et plus complexes.

## 9 – Conclusion

Nous avons parlé principalement des joints statiques. Les problèmes posés par les joints dynamiques sont plus importants mais les mêmes principes généraux s'appliquent. Il faut remarquer que dans la pratique courante, alors qu'une étanchéité absolue est souvent nécessaire pour des expériences de grande durée sous pression de gaz, le rôle joué par des joints dynamiques est souvent moins critique et le degré d'étanchéité requis moindre. Pour finir, il faut insister sur l'importance économique de faire un bon choix de la pression maximale de service d'une installation à gaz. Des frontières technologiques qui ne sont certes pas absolues existent, qui se reflètent dans les gammes de matériel proposées par les fabricants. En-dessous de 100 à 200 MPa, on considérera tout d'abord l'utilisation de joints toriques et des liaisons métal / métal du commerce. De 200 à 400 MPa, une combinaison de cône sur cône, de joints champignons et de joints toriques, permet de réaliser des montages fiables et utilisables dans des laboratoires non spécialisés. Entre 400 et 700 MPa, il existe encore de nombreuses possibilités de réalisation mais les coûts augmentent considérablement. Au-delà de 700 MPa, un support technique relativement lourd devient indispensable pour des appareils à gaz. Il faut donc bien choisir la pression en fonction des problèmes à traiter et du support technique disponible.

## Remerciements

Nous remercions nos collègues qui nous ont communiqué des informations précieuses sur leur longue expérience dans ce domaine, en particulier J.M. Besson, P. Boivin, J.J. Capponi, A. Draperi, B. Ferrand, P. Langlois, L. Mélési. R. Argoud remercie les personnes qui ont introduit les techniques HP sur le site du polygone de Grenoble, plus particulièrement Jean Muller. J. Roux remercie ses collègues et prédécesseurs au CRSCM, notamment G. Sabatier, J.T. Iiyama, G. Humbert et A. Lefèvre qui sont à l'origine de l'expérimentation HP dans ce laboratoire. Nos remerciements vont aussi aux membres du réseau Hautes Pressions du CNRS qui ont répondu aux demandes d'information : G. Charton, F. Dumas, F. Gaill, B. Goffe, G. Jenner, A. Largeveau, P. Lemay, A. Migault, L. Saldana et B. Shillito.

## 10 – Bibliographie

- Comings, E. W., 1956, High pressure technology Mc Graw-Hill <http://dx.doi.org/10.1002/aic.690030127>
- Bridgman P. W., 1958, The Physics of high pressure. London, G. Bell and Sons, Ltd.
- Wentorf, R. H. Jr., 1962, Modern very high pressure techniques London, Butterworths  
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0508-3443/18/7/301/meta>
- Tsiklis D. S., 1968, Handbook of techniques in high pressure research and engineering Plenum Press, New York. Bradley, C. C., 1969, High pressure methods in solid state research. London, Butterworths  
[http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4684-8360-4\\_3](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4684-8360-4_3)
- Paureau J., 1975, Nouveau dispositif d'étanchéité pour hautes pressions, Revue de Physique Appliquée, 10, 475-478. <http://dx.doi.org/10.1051/rphysap:01975001006047500>
- Spain I. L., Paauwe J., 1977 High pressure technology, vol. I, equipment design, material and properties. Marcel Dekker, inc. NewYork and Basel. <http://dx.doi.org/10.1002/cite.330501128>
- Sherman W. et Stadtmuller A. A., 1987, Experimental techniques in high pressure research. Wiley, Chichester. Eremets M. 1996, High pressure experimental methods. Oxford University Press
- Holzapfel W. B. et Isaacs N. S. 1997, Techniques in Chemistry and Physics. Oxford University Press.
- Mao H. K., 1979, NATO ASI- Series B= Physics Vol 186 Editeurs Polian A. et Loubeyre P., Plenum Press, New-York,