



DOSSIER

TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

l'expertise technique et scientifique de référence

b5420

Étanchéité en mécanique

Par :

Jean MARTIN

*Ingénieur de l'École nationale supérieure d'Arts et Métiers, Professeur de construction mécanique en IUT
(Institut Universitaire de Technologie)*

Ce dossier fait partie de la base documentaire

Guidage mécanique

dans le thème **Fonctions et composants mécaniques**

et dans l'univers **Mécanique**

Document délivré le 05/09/2012

Pour le compte

7200031367 - air liquide crcd // vincent HELOIN // 194.2.193.253

Pour toute question :

Service Relation Clientèle • Éditions Techniques de l'Ingénieur • 249, rue de Crimée
75019 Paris – France

par mail : infos.clients@teching.com ou au téléphone : 00 33 (0)1 53 35 20 20



Techniques
de l'Ingénieur

Étanchéité en mécanique

par **Jean MARTIN**

Ingénieur de l'École nationale supérieure d'Arts et Métiers

Professeur de construction mécanique en IUT (Institut Universitaire de Technologie)

| | |
|---|--------------|
| 1. Types d'étanchéité | B 5 420 - 2 |
| 1.1 Définition d'une fuite..... | — 2 |
| 1.2 Étanchéité volumique..... | — 2 |
| 1.3 Étanchéité aux liaisons..... | — 2 |
| 2. Degrés d'étanchéité | — 3 |
| 3. Débit de fuite | — 3 |
| 3.1 Écoulement par diffusion ou perméabilité..... | — 3 |
| 3.2 Écoulement à travers un orifice | — 3 |
| 3.3 Utilisation du régime de fuite. Essais. Fonctionnement..... | — 4 |
| 4. Détection et mesure des fuites | — 5 |
| 4.1 Essais d'étanchéité | — 5 |
| 4.2 Contrôle en service..... | — 6 |
| 5. Étanchéité aux liaisons statiques | — 7 |
| 5.1 Étanchéité rigoureuse..... | — 7 |
| 5.2 Étanchéité relative | — 8 |
| 6. Étanchéité aux liaisons dynamiques en translation | — 20 |
| 6.1 Étanchéité rigoureuse..... | — 20 |
| 6.2 Étanchéité par fuite contrôlée..... | — 21 |
| 6.3 Étanchéité relative | — 22 |
| 7. Étanchéité aux liaisons dynamiques en rotation | — 28 |
| 7.1 Étanchéité rigoureuse..... | — 28 |
| 7.2 Étanchéité par fuite contrôlée..... | — 28 |
| 7.3 Étanchéité relative | — 30 |
| Pour en savoir plus | Doc. B 5 420 |

L'étanchéité est une fonction qui revêt une importance de plus en plus grande en mécanique par suite, d'une part de l'utilisation croissante des fluides pour les commandes (hydrauliques, pneumatiques) et pour les contrôles et, d'autre part, du nombre très important et de la très grande diversité des composants mécaniques dans les réseaux de fluides.

Le confinement d'un gaz ou d'un liquide, de par sa nature, n'est pas aisé. Une fuite, même petite, peut avoir de multiples conséquences, tant sur le plan de la disponibilité du matériel que sur celui du fonctionnement et aussi de la sécurité. Des exemples courants montrent que des ensembles fort complexes, tels que les fusées, peuvent connaître des ennuis importants par suite d'une simple fuite. Une bonne fiabilité en matière d'étanchéité n'est pas souvent facile à obtenir.

En effet, l'étanchéité fait appel à de nombreuses notions de physique et de chimie où les propriétés des matériaux tiennent une place importante. De plus, les problèmes à résoudre sont variés et doivent intégrer un nombre important de paramètres difficiles à optimiser simultanément, spécialement en dynamique.

Les meilleures solutions en techniques d'étanchéité ne sont presque toujours que le résultat de savants compromis.

| Notations et symboles | | |
|-----------------------|---|---------------------------------|
| Symbole | Désignation | Unité |
| C | couple..... | $m \cdot N$ |
| D | diamètre de l'alésage..... | m |
| D_F | coefficient de diffusion | $m^2 \cdot s^{-1}$ |
| D_g | diamètre de la gorge..... | m |
| D_{jm} | diamètre moyen du joint torique libre | m |
| F | force | N |
| L | longueur du parcours du fluide ou épaisseur de la paroi | m |
| P | pression du fluide | Pa |
| P_e | pression d'entrée | Pa |
| P_s | pression de sortie..... | Pa |
| Q_m | débit massique..... | $kg \cdot s^{-1}$ |
| Q_v | débit volumique (liquide) | $m^3 \cdot s^{-1}$ |
| S | aire..... | m^2 |
| S_g | aire de la gorge | m^2 |
| S_j | aire du jeu minimal d'écoulement du fluide..... | m^2 |
| V | vitesse périphérique de l'arbre .. | $m \cdot s^{-1}$ |
| W | puissance | W |
| d | diamètre de l'arbre..... | m |
| d_f | diamètre d'un défaut | m |
| d_j | diamètre de corde du joint torique libre | m |
| j | jeu diamétral..... | m |
| q | flux gazeux..... | $Pa \cdot m^3 \cdot s^{-1}$ |
| q_D, q_i, q_M, q_v | flux par diffusion, intermédiaire, moléculaire, visqueux..... | $Pa \cdot m^3 \cdot s^{-1}$ |
| t | temps | s |
| γ | tension superficielle du fluide.... | $N \cdot m^{-1}$ |
| δ | excentration arbre-alésage..... | m |
| η | viscosité dynamique absolue du fluide..... | $Pa \cdot s$ |
| ρ | masse volumique du fluide..... | $kg \cdot m^{-3}$ |
| ρ_v | masse volumique unitaire du fluide..... | $kg \cdot m^{-3} \cdot Pa^{-1}$ |
| ω | vitesse angulaire | $rad \cdot s^{-1}$ |

1. Types d'étanchéité

L'**étanchéité** est la qualité de confinement dans un appareil d'un fluide, liquide ou gaz, mais aussi de très fines particules solides en suspension dans un gaz.

1.1 Définition d'une fuite

L'étanchéité n'est plus satisfaite, en théorie, s'il existe une fuite, qui se traduit par l'écoulement du fluide confiné d'un côté à l'autre de la paroi de confinement sous l'action d'une différence de pression ou de concentration de part et d'autre de cette paroi.

Une fuite peut avoir deux causes :

- **perméabilité de la matière** : certains matériaux peuvent, même à température ordinaire, par une succession de phénomènes plus ou moins complexes d'absorption, de solubilité et de désorption, laisser passer le fluide ; les élastomères sont par exemple des matériaux relativement perméables, surtout avec certains gaz, alors que les métaux ne le sont pratiquement pas, tout au moins jusqu'à un certain seuil de température assez élevé (à titre indicatif, pour le nickel, vers 800 °C) ; toutefois, les fuites par perméabilité restent suffisamment faibles pour que, dans la plupart des applications, elles soient négligées ;

- **défauts débouchants** : il peut exister, ou se créer, par corrosion par exemple, dans la paroi ou aux surfaces de raccordement, des défauts (fissures, petits trous dans les soudures, rainures), qui constituent des chemins pour le fluide ; si des trous sont très petits et très nombreux tout en étant assez régulièrement répartis, le défaut s'appelle *porosité*.

1.2 Étanchéité volumique

Un appareil doit être étanche dans son intégralité, c'est-à-dire dans son volume. Ce volume est limité par sa surface extérieure, d'où les appellations d'**étanchéité volumique** ou **surfactive**. Le plus souvent, un appareil est l'assemblage de différentes parties. L'étanchéité totale est la somme de l'étanchéité des surfaces continues de la matière constituant l'enveloppe et de celle des surfaces de liaisons des différentes parties entre elles.

L'étanchéité volumique est généralement assez facile à obtenir et avec une très bonne qualité. C'est essentiellement la matière elle-même qui peut être responsable de fuites (perméabilité de certains matériaux hétérogènes, défauts de fonderie, réseaux moléculaires, etc.). Un choix judicieux du matériau et de son élaboration permet d'éliminer toutes ces perturbations.

Par contre, l'étanchéité aux liaisons pose les problèmes les plus nombreux et les plus difficiles à résoudre. La plupart des solutions proposées pour résoudre des problèmes d'étanchéité se rapportent aux liaisons.

1.3 Étanchéité aux liaisons

Il faut en distinguer deux types :

- **en statique**, la jonction doit être généralement démontable, au moins de temps à autre ; les surfaces assemblées sont variées : plans, sphères, cylindres, cônes, etc. ;

- **en dynamique**, la jonction est telle que l'une des deux surfaces est mobile par rapport à l'autre, ces surfaces étant souvent de même nature géométrique.

On distingue les étanchéités pour mouvement de translation, par exemple celle d'une tige de vérin au travers du corps, des étanchéités pour mouvement de rotation, telle celle d'un arbre de pompe à travers la volute. Celles relatives aux mouvements variés résultent toujours de la combinaison des deux précédentes.

2. Degrés d'étanchéité

Par suite de la structure moléculaire discontinue de la matière, une paroi de confinement ne peut, en théorie, assurer la conservation pendant un temps infini d'un fluide dont les molécules sont en mouvement : l'étanchéité absolue n'existe donc pas. Toutefois, une très bonne étanchéité est souvent nécessaire, ce qui se traduit par plus ou moins de difficultés à vaincre pour y parvenir. La qualité de l'étanchéité est très variable suivant les applications et il est possible de distinguer plusieurs niveaux ou degrés :

- l'**étanchéité rigoureuse** qui ne conduit à aucune fuite décelable avec les appareils de mesure utilisés ; ces appareils sont alors de très grande sensibilité et la fuite existante est extrêmement faible (de l'ordre de $10^{-12} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) ;

- l'**étanchéité à fuite contrôlée** qui admet une fuite, mais déterminée à l'avance et pratiquement constante dans le temps ; ce type se rencontre essentiellement dans les étanchéités dynamiques ;

- l'**étanchéité relative**, qui admet une fuite, sa valeur dépendant de l'application du matériel ; elle peut varier dans une gamme très large allant de 10^{-12} à $10^{-1} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, pour se situer le plus souvent entre 10^{-10} et $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; c'est évidemment le cas le plus courant.

Il ne faut pas oublier que réduire les fuites à des valeurs très faibles est souvent difficile et conduit à une augmentation des coûts. Le choix du degré d'étanchéité doit donc tenir compte de ce facteur.

3. Débit de fuite

Une fuite est caractérisée quantitativement par le débit du fluide qui s'échappe du confinement. Il s'exprime :

- soit par la masse qui circule par unité de temps, l'unité légale étant le kilogramme par seconde (kg/s) ; pratiquement, cette unité étant trop grande, ce sont des sous-multiples comme le gramme par seconde (g/s) ou par heure (g/h) qui sont le plus souvent utilisés ;

- soit par le volume qui circule par unité de temps, exprimé en mètre cube par seconde (m^3/s) ; là aussi, ce sont des sous-multiples comme le centimètre cube par seconde (cm^3/s) ou par heure (cm^3/h) qui sont souvent utilisés.

Si, avec les liquides, considérés comme incompressibles, la pression n'intervient pas, il n'en est pas de même avec les gaz. Il est nécessaire de préciser la pression de référence du gaz qui fuit. Pour cela, il est fait appel au flux gazeux q , ou débit énergétique, qui est égal à :

$$q = \frac{E}{t} \cdot P \quad (1)$$

avec E volume de fuite perdu, à la pression P pendant le temps t .

L'unité légale est le **pascal-mètre cube par seconde**. Cette unité est aussi égale au watt. D'autres unités sont utilisées, en particulier le lusec, dans les contrôles d'étanchéité. L'équivalence de ces unités avec l'unité légale est la suivante :

$$1 \text{ atm} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 0,1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$1 \text{ mbar} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} = 0,1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$1 \text{ Torr} \cdot \text{L} \cdot \text{s}^{-1} = 0,13 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$1 \text{ lusec} = 1,3 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

Le débit de fuite, ou flux gazeux, dépend du régime d'écoulement du fluide à travers les défauts, c'est-à-dire surtout de leurs dimensions et de la pression du fluide.

3.1 Écoulement par diffusion ou perméabilité

Ce type de fuite a surtout lieu avec les gaz.

Le flux gazeux q_D par diffusion est donné par :

$$q_D = \frac{D_F S (P_e - P_s)}{L} \quad (2)$$

avec D_F coefficient de diffusion,

L épaisseur de la paroi,

S aire de diffusion de la paroi.

Des valeurs de D_F des principaux élastomères et matières plastiques sont données pour quelques gaz dans le tableau 1 ; ce coefficient augmente rapidement avec la température.

3.2 Écoulement à travers un orifice

Il faut distinguer quatre types d'écoulement.

3.2.1 Écoulement turbulent

La pression et la vitesse du fluide sont élevées, le diamètre du défaut est supérieur à 10^{-4} m. Le débit massique est proportionnel à la racine carrée du gradient de pression et dépend beaucoup de la rugosité de la paroi. Ce régime est caractérisé par un nombre de Reynolds supérieur à 2 200. Il ne se rencontre que pour des fuites importantes, essentiellement avec les gaz ; ces fuites sont le plus souvent inadmissibles.

3.2.2 Écoulement laminaire ou visqueux

La pression et la vitesse du fluide sont plus faibles que dans le cas précédent. Les lignes de courants ont tendance à devenir rectilignes. La vitesse est pratiquement nulle près de la paroi. Le débit massique est proportionnel au gradient de pression et dépend très peu de la rugosité de la paroi. Ce régime est caractérisé par un nombre de Reynolds inférieur à 1 200.

Il faut remarquer que, pour des nombres de Reynolds compris entre 2 200 et 1 200, le régime peut être soit laminaire soit turbulent, suivant la rugosité ; il possède une certaine instabilité.

Avec les liquides ou les gaz, le débit massique est donné par :

$$Q_m = \frac{\pi d_f^4 \rho}{128 L \eta} (P_e - P_s) \quad (3)$$

Avec les liquides, il faut tenir compte des effets de capillarité. Ils exercent sur les bords d'entrée et de sortie du défaut une tension superficielle γ , à laquelle on peut faire correspondre une contre-pression égale à $\frac{4\gamma}{d_f}$ qui peut masquer la fuite.

Par exemple, avec de l'eau à 20 °C, $\gamma = 7 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, la contre-pression pour un défaut de diamètre égal à 10^{-6} m sera de $2,8 \times 10^5$ Pa.

Le débit massique vaut donc, en réalité, pour les liquides :

$$Q_m = \frac{\pi d_f^4 \rho}{128 L \eta} \left[P_e - \left(P_s + \frac{4\gamma}{d_f} \right) \right] \quad (4)$$

Ce régime est pratiquement celui rencontré avec les liquides dans le cas de nombreuses étanchéités industrielles courantes. L'ordre de grandeur du diamètre du défaut est de 10^{-5} m (ou un peu supérieur), le flux gazeux est alors supérieur à environ $10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Tableau 1 – Coefficient de diffusion D_F d'élastomères et de matières plastiques (en $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

| Matériau | | Gaz | | Oxygène | | Azote | | Gaz carbonique | | Hydrogène | | Méthane | | Air | |
|---------------------|--------------------------|-----------|-------|---------|-------|-------|-------|----------------|-------|-----------|-------|---------|-------|-------|--|
| | | 25 °C | 50 °C | 25 °C | 50 °C | 25 °C | 50 °C | 25 °C | 50 °C | 25 °C | 50 °C | 25 °C | 50 °C | 25 °C | |
| Élastomères | Butadiène acrylo-nitrile | 3,2 | 10,5 | 0,9 | 3,7 | 23 | 66 | 11,5 | 31,5 | 2,4 | 10,1 | 1,3 | | | |
| | Polychloroprène | 3 | 10 | 0,9 | 3,55 | 19,5 | 56,5 | 10,3 | 28,5 | 2,5 | 9,8 | 1 | | | |
| | Polyisobutylène | 0,3 | 1 | 0,11 | 0,35 | 0,03 | 0,1 | 0,03 | 0,1 | 0,01 | 0,33 | 0,2 | | | |
| | Poly(styrène/butadiène) | 13 | 34,5 | 4,8 | 14,5 | 94 | 195 | 30,5 | 74 | 16 | 43 | 2,5 | | | |
| | Silicone | 100 à 600 | | | | | | 300 à 600 | | | | | | | |
| | Fluoré | 1,5 | | 0,4 | | 7,5 | | | | | | | | 0,6 | |
| Matières plastiques | PTFE | 0,5 | | 0,1 | | 0,5 | | | | | | | | 0,1 | |
| | Polyamide | 0,35 | | 0,01 | | 0,16 | | | | | | | | 0,02 | |

Le flux gazeux en régime visqueux q_v est :

$$q_v = \frac{\pi d_f^4}{128 L \eta} \left(\frac{P_e^2 - P_s^2}{2} \right) \quad (5)$$

Si la pression de gaz diminue, le régime d'écoulement visqueux change progressivement. Au-dessous d'une certaine pression, les filets gazeux, au contact des parois, s'en décollent. Il se produit un régime transitoire, le gaz ne se déplace plus d'un mouvement d'ensemble caractérisé par les filets du régime laminaire, les molécules acquièrent une certaine individualité. Ces molécules se propagent directement entre les parois du défaut, sans orientation définie et au détriment des chocs intermoléculaires. L'écoulement passe en régime moléculaire.

3.2.3 Écoulement moléculaire

Le libre parcours moyen des molécules est de l'ordre de grandeur du diamètre du défaut. L'action de la viscosité due aux collisions entre molécules devient négligeable.

L'écoulement est fortement influencé par la rugosité du défaut.

Ce régime est défini pour un nombre de Knudsen inférieur à 1, ce nombre étant donné par :

$$K_n = \frac{d_f}{\lambda_m} \quad (6)$$

avec λ_m libre parcours moyen des molécules.

Le flux gazeux q_M a pour expression :

$$q_M = \frac{d_f^3}{3 L} \left(\frac{\pi}{2 \rho_v} \right)^{1/2} (P_e - P_s) \quad (7)$$

avec ρ_v masse volumique unitaire du gaz définie par :

$$\rho_v = \frac{M}{RT}$$

avec M ($\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$) masse moléculaire,

R constante des gaz parfaits ($= 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$),

T (K) température absolue.

Le régime moléculaire correspond à des défauts dont le diamètre est de l'ordre de 10^{-7} m (ou inférieur). C'est le cas des installations à haut degré d'étanchéité ; c'est souvent aussi celui des tests d'étanchéité par mise sous vide.

3.2.4 Régime intermédiaire (entre les écoulements visqueux et moléculaire)

Il est obtenu pour des nombres de Knudsen compris entre 1 et 200.

Le flux gazeux q_i est alors donné par :

$$q_i = q_v + Z q_M \quad (8)$$

avec Z fonction qui dépend de d_f , $(P_e - P_s)$, η et ρ_v , et qui varie de 0,88 pour un nombre de Knudsen de 1 à 0,81 pour un nombre de Knudsen de 200, pour l'air.

Il faut remarquer que la vitesse d'écoulement d'un gaz dans un défaut ne peut excéder la vitesse du son dans le gaz ; le flux gazeux a donc une limite supérieure. Il faut parfois vérifier si cette valeur n'est pas atteinte et en tenir compte.

3.3 Utilisation du régime de fuite. Essais. Fonctionnement

Dans le cas des liquides, pour les petites fuites, le régime est toujours laminaire. Pour des fuites importantes, de l'ordre de quelques centimètres cubes par seconde, il peut être turbulent.

En revanche, avec les gaz, les différents régimes de fuite se rencontrent. S'il s'agit d'un matériau ayant une perméabilité non négligeable, telle une membrane mince en élastomère, il est facile de calculer le flux gazeux qui la traverse à l'aide de la formule (2).

Pour les fuites dues à des défauts, la connaissance du régime d'écoulement est souvent nécessaire, spécialement avant le test d'étanchéité. En effet, les conditions de test (pression, température, nature du gaz) peuvent être différentes de celles du gaz à confiner dans l'utilisation.

Il faut pouvoir transposer le flux gazeux maximal admis en service, à celui en essais. Si les régimes de fuite sont identiques, les transpositions sont faciles, compte tenu des formules (3), (4), (5) et (7) ; encore faut-il connaître le régime dans lequel se produit la fuite, régime qui peut être déterminé à partir du nombre de Reynolds ou du nombre de Knudsen. Mais si le régime de fuite change, cette transposition est plus compliquée.

4. Détection et mesure des fuites

Il est nécessaire, après fabrication, parfois pendant la fabrication et avant mise en service, de contrôler si le dispositif de confinement répond au cahier des charges. Pour cela, des essais d'étanchéité sont effectués et éventuellement les défauts corrigés.

Mais une fuite peut se produire en service par suite d'une dégradation du matériel. Il est souvent important de détecter cette fuite et d'en connaître l'importance pour savoir si le matériel est encore apte au service. C'est le contrôle en service, différent de celui en fabrication.

4.1 Essais d'étanchéité

Par suite de la plus grande aptitude à fuir des gaz par rapport aux liquides, ce sont les premiers qui sont de très loin les plus utilisés

pour les détections et mesures des fuites en fabrication ou aux essais. La sensibilité est d'ailleurs d'autant meilleure que la masse volumique du gaz est plus faible. Ce serait donc l'hydrogène qui conviendrait le mieux mais, par suite des risques d'explosion qu'il entraîne, il n'est pratiquement pas utilisé. Le gaz de détection est souvent appelé gaz traceur. Parfois, le gaz d'essai est un mélange d'un gaz porteur, comme par exemple l'azote, et du gaz traceur.

Il existe de nombreuses méthodes de détection et de mesure de fuite, faisant appel à des appareillages très simples ou très sophistiqués, de sensibilité très variable.

On distingue les méthodes de localisation qui permettent de situer la fuite, et par suite généralement d'y porter remède si elle est prohibitive, et les méthodes de mesure de cette fuite. Certaines peuvent servir à la fois à la localisation et à la mesure [1].

Le tableau 2 en donne une synthèse.

4.1.1 Détection à la bulle

Consiste à badigeonner la surface à contrôler d'un liquide qui contient un agent moussant (méthode dite à la bulle de savon),

Tableau 2 – Essais d'étanchéité

| Méthode | Gaz d'essai | Principe de la méthode | Restriction d'emploi | Sensibilité maximale $\text{Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ | Observations | |
|------------------------------------|----------------------------|---|---|---|---|---|
| À la bulle (§ 4.1.1) | Air ou N_2 | Badigeonner la surface avec un liquide additionné d'un produit moussant, le récipient est sous pression | Pièce ne supportant pas la pression | 10^{-5} | Méthode de détection locale. Pression minimale nécessaire pour vaincre la pression capillaire | |
| Par immersion (§ 4.1.2) | Air ou N_2 | Immerger l'appareil dans un liquide et recueillir le gaz dans une cloche graduée | Pièce ne supportant pas une immersion ni une pression | 10^{-6} | Méthode de détection globale. Pression minimale nécessaire pour vaincre la pression superficielle | |
| Par chute de pression (§ 4.1.3) | Air | Isoler l'appareil sous pression et mesurer la chute de pression pendant un temps donné | Pièce ne supportant pas une pression | 10^{-5} | Méthode de détection globale. Influence néfaste des variations de température | |
| Par remontée de pression (§ 4.1.4) | Vide | Isoler l'appareil après avoir fait le vide et mesurer la remontée de pression pendant un temps donné | Pièce ne supportant pas le vide. Surface dégazante | 10^{-4} | Méthode de détection globale. Erreur par excès, par suite du dégazage des surfaces | |
| Par gaz traceur | NH_3 (§ 4.1.5.1) | NH_3 | Placer sur la surface extérieure des bandes réactives à l'ammoniac et remplir de NH_3 | Pièces grasses, en cuivre et ses alliages | 10^{-8} | Méthode plutôt de détection locale. Problème de sécurité (explosion, asphyxie) |
| | Gaz halogène (§ 4.1.5.2) | Fréon 12 ou Fréon 22 | Plusieurs façons ; pour la plus courante, l'appareil est rempli de Fréon à basse pression et un détecteur est promené à l'extérieur | Problème de pollution, si un autre halogène est déjà présent | 10^{-7} | Méthode plutôt de détection locale, mais aussi globale. Assez spécifique (industrie frigorifique) |
| | Gaz radioactif (§ 4.1.5.3) | ^{85}Kr | L'appareil est rempli par un gaz contenant du ^{85}Kr ; un compteur radioactif est placé à l'extérieur | Radioactivité interdite | 10^{-10} | Précautions importantes vis-à-vis du personnel. Méthode de détection locale, voire globale |
| | Hélium (§ 4.1.5.4) | par aspersion | He ou He + N_2 | L'appareil est mis sous vide et en communication avec le détecteur (spectromètre). De l'hélium est envoyé à l'extérieur | Pièce ne supportant pas le vide | 10^{-13} |
| par reniflage | | He ou He + N_2 | L'appareil est gonflé d'hélium ou d'un gaz avec de l'hélium. On aspire avec une ventouse branchée sur un spectromètre | Aucune | 10^{-11} | Méthode locale mais, par intégration, aussi globale |
| par ressuage | | He ou He + N_2 | La pièce est immergée dans l'hélium puis remise à l'air, puis mise sous vide avec pompage sur un spectromètre | Pièce ne supportant ni la pression, ni le vide | 10^{-10} | Méthode globale. Petites pièces et en grandes séries |
| Par ultrasons (§ 4.1.6) | Air | Un émetteur d'ultrasons 40 kHz est placé dans l'appareil. Un micro est promené à l'extérieur | Possibilité de placer un émetteur d'ultrasons | 10^{-2} | Méthode de détection locale | |

l'enceinte de confinement étant mise sous pression par de l'air ou de l'azote. Le liquide est souvent de l'eau additionnée d'un produit tensio-actif (*Teepol* ou alcool laurique sulfoné) qui réduit la tension superficielle. La surpression minimale ΔP_ℓ à appliquer pour vaincre la tension superficielle dans le cas de l'eau pure est :

$$\Delta P_\ell = \frac{2\sigma}{d_f}$$

Cette méthode, couramment utilisée, est surtout une méthode de localisation. La précision maximale obtenue par un opérateur exercé est de $10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4.1.2 Détection par immersion

C'est un peu une version différente de la précédente (§ 4.1.1). L'appareil à tester est immergé dans un liquide et le gaz qui s'échappe est recueilli dans un dispositif gradué pendant un temps donné.

Il s'agit surtout d'une mesure du flux gazeux. La précision maximale est de l'ordre de $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4.1.3 Méthode par chute de pression

Cette méthode extrêmement simple consiste à gonfler l'appareil à tester à une pression déterminée, à l'isoler d'une manière sûre et à mesurer la baisse de pression ΔP pendant un temps donné t . Le flux gazeux est alors :

$$q = \frac{\Delta P \cdot E}{t}$$

avec E volume de l'appareil.

Une source d'erreur importante est la variation de température du gaz entre le début et la fin de l'essai, qu'il n'est pas facile de rendre pratiquement nulle. Une variation de température supérieure à $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ introduit une erreur significative qu'il est possible de corriger si l'on connaît cette variation. C'est une méthode surtout utilisée pour les grands volumes et pour des ensembles difficilement mobiles.

Compte tenu de la précision des manomètres actuels, de l'ordre de 1 Pa , le flux gazeux minimal décelable est de $10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Cette méthode est exclusivement quantitative.

4.1.4 Méthode par remontée de pression

C'est l'inverse de la précédente. L'appareil à tester est mis sous vide, puis isolé de la pompe à vide et la remontée de pression ΔP est mesurée pendant un temps t .

Le flux gazeux q est :

$$q = \frac{E \cdot \Delta P}{t}$$

Plus le volume est petit, plus la sensibilité est grande ; elle est limitée par le dégazage des parois et la sensibilité maximale est de l'ordre de $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. C'est une méthode très peu utilisée, qui n'est que quantitative.

4.1.5 Méthode par détection de gaz traceur

Plusieurs gaz peuvent être utilisés : ammoniac, gaz halogènes (en général *Fréons*), gaz radioactifs et hélium.

4.1.5.1 Ammoniac

L'appareil est rempli d'ammoniac à une pression relative basse, souvent de 2 à 3 bar. La surface extérieure de l'appareil à tester, ou simplement les parties à vérifier, sont recouvertes de bandes révélatrices imprégnées d'un mélange de bleu de bromophénol et

d'acide orthophosphorique. Les points de fuite sont impressionnés par l'ammoniac : il y a donc localisation. Une mesure dosimétrique permet d'apprécier l'ordre de grandeur de la fuite.

C'est une méthode sensible, le flux gazeux minimal décelable étant de $10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Elle s'applique surtout aux très grands volumes, supérieurs à 10 m^3 . Dans ce cas, des précautions d'emploi sont nécessaires.

4.1.5.2 Gaz halogènes

Le gaz traceur mis dans l'appareil à contrôler est le plus souvent du *Fréon 12*, voire du *Fréon 22*. Sa pression relative est de l'ordre de $0,05 \text{ MPa}$. Un appareil de détection spécial, utilisant les ions positifs émis par le gaz, explore la surface. La sensibilité est au maximum de $10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La méthode peut être globale ou de localisation. Elle est très courante dans l'industrie frigorifique.

4.1.5.3 Gaz radioactifs

Le gaz le plus utilisé est le krypton 85. Il est détecté par un compteur à scintillations.

La sensibilité est de $10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Cette méthode est intéressante pour des appareils d'accès difficile, mais l'emploi de radioéléments est une gêne importante.

4.1.5.4 Hélium

Il s'agit du gaz le plus intéressant et le plus utilisé. Sa détection est réalisée par un spectromètre de masse, ce qui permet d'avoir une sensibilité extrêmement grande atteignant $10^{-14} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Plusieurs possibilités d'utilisations existent, en particulier :

- **par aspersion** : l'appareil à contrôler est mis sous vide et en communication avec le détecteur ; l'hélium est injecté à l'extérieur, soit globalement (à l'intérieur d'une enveloppe légère en plastique contenant l'appareil), soit localement (directement sur les parties à vérifier, à l'aide d'une fine buse) ; la sensibilité est de $10^{-13} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, cette méthode est très employée industriellement ; la localisation et la mesure globale sont possibles ;

- **par reniflage** : de l'hélium est injecté dans l'appareil et aspiré, s'il y a fuite, par le détecteur extérieur, en particulier à l'aide d'une ventouse déplacée de proche en proche ; la sensibilité est de $10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$;

- **par ressuage** : la pièce à contrôler est immergée dans l'hélium sous pression, puis remise à l'air ; elle est ensuite mise dans une enceinte à vide reliée au détecteur ; il n'y a pas de localisation possible ; cette méthode est utilisée pour des petites pièces et pour des grandes quantités à tester ; la sensibilité est de $10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4.1.6 Méthode par ultrasons

C'est une méthode nouvelle encore peu développée et peu sensible. Un émetteur ultrasonore de 40 kHz est placé dans l'appareil et un micro sensible est déplacé sur la surface. Il y a une localisation possible de la fuite mais une mesure quantitative est difficile. La sensibilité maximale est de $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

4.2 Contrôle en service

Il est beaucoup plus difficile de détecter et d'évaluer des fuites sur un appareil en service. Plusieurs procédés sont toutefois possibles.

4.2.1 Double barrière

D'une manière générale, cela consiste à entourer la barrière d'étanchéité d'une seconde barrière plus légère et à détecter la fuite dans l'espace ainsi constitué.

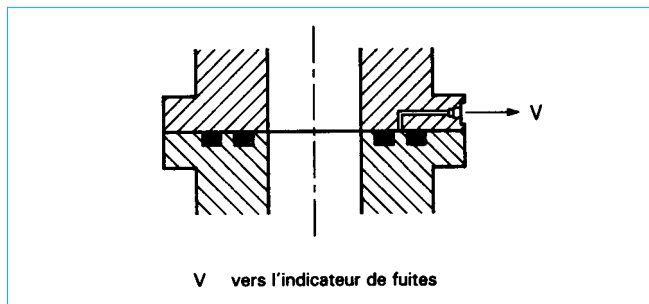


Figure 1 – Détection de fuite par double joint

Avec les **liquides**, un détecteur peut être placé au point bas. Par exemple, pour les tuyauteries véhiculant du sodium liquide, ce métal conducteur peut fermer un circuit électrique.

Avec les **gaz**, c'est l'augmentation de pression entre les deux barrières qui est généralement utilisée. Un cas très fréquent est celui des brides. Deux joints concentriques sont utilisés et l'espace entre eux est raccordé à un manomètre précis ou à un détecteur spécialisé (figure 1).

Le joint de récupération, non sollicité en permanence ou très peu lors d'une fuite, ne pose pas de difficultés.

4.2.2 Détecteur chimique

Il s'agit d'une substance chimique très sensible au gaz confiné. Si ce dernier fuit, il va agir sur cette substance. Ce procédé est utilisé par exemple sur des extractions de produits de ventilation que l'on fait passer dans un récipient enduit de réactif. Cette méthode ne permet pas en général une localisation de la fuite.

4.2.3 Détecteur acoustique

Lorsqu'un gaz s'écoule à travers un défaut, il atteint facilement la vitesse du son. Pour cela, il suffit en effet que le rapport des pressions de part et d'autre de la paroi soit supérieur à la valeur critique qui définit le seuil d'écoulement sonique (voisin de 0,5 pour l'air).

Une fuite importante, de l'ordre de $10^2 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, peut être entendue à l'oreille. Ce bruit diminue rapidement si le flux gazeux diminue et passe dans une bande non audible. Des micros adaptés permettent néanmoins de capter ces sons et de les transformer en signaux.

La localisation est possible. Plusieurs micros branchés en permanence permettent de détecter un début de fuite. La sensibilité est faible, de l'ordre de $10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

5. Étanchéité aux liaisons statiques

Suivant le degré d'étanchéité (§ 2) à obtenir, diverses solutions sont possibles.

5.1 Étanchéité rigoureuse

Pratiquement, l'étanchéité rigoureuse ne peut être obtenue que par une liaison du type métallurgique (soudure ou brasure), c'est-à-dire avec diffusion au moins partielle des surfaces à joindre. Ce type de liaison est réputé indémontable, mais des formes particulières permettent un certain nombre de démontages, toutefois en nombre limité, le plus souvent de l'ordre de 10.

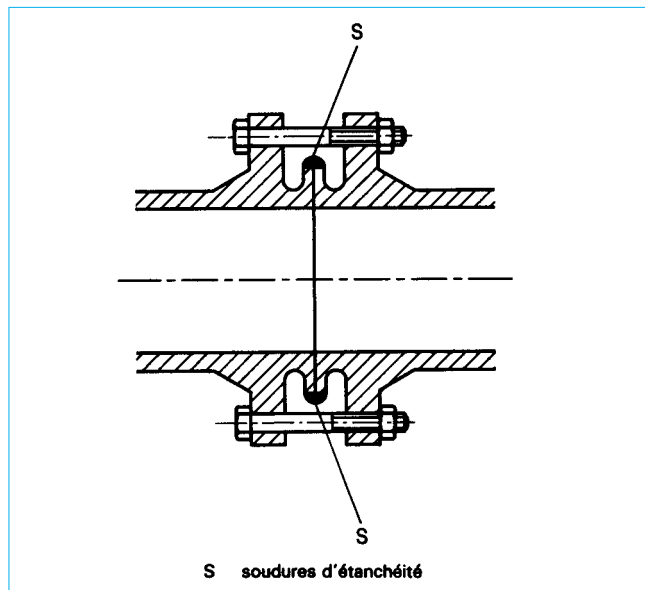


Figure 2 – Bride à souder

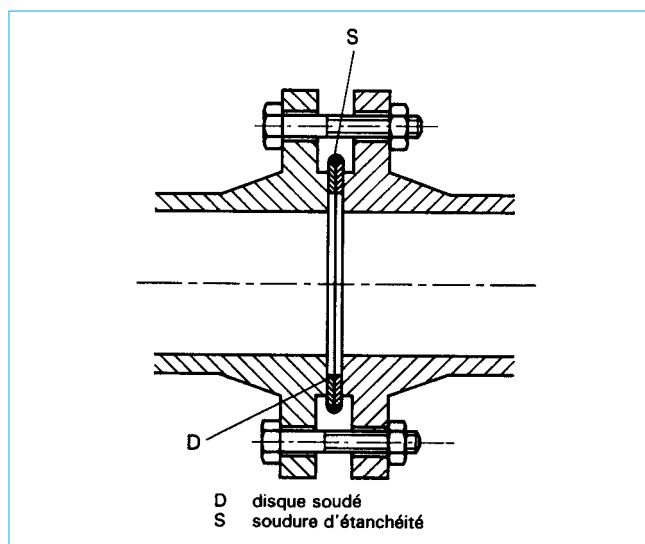


Figure 3 – Bride à souder à plaques rapportées

Une première solution, mise en œuvre sur les brides, dites brides type Sarlin, consiste à séparer la fonction jonction mécanique de celle d'étanchéité. Cette dernière est faite par soudure sur des parties minces (figure 2), qui peuvent être aisément meulées pour le démontage. La nouvelle soudure doit être réalisée sur un métal sain, donc sur un diamètre plus petit donné par un meulage de ravivage. Il existe donc une certaine consommation de matière des lèvres qui limite le nombre d'interventions. Toutefois il est possible d'en augmenter le nombre en rapportant les lèvres sous formes de disques minces soudés (figure 3).

Avec les liaisons filetées, il est aussi possible de disposer de bagues minces soudées, faciles à meuler. Il est nécessaire d'éloigner assez la soudure de la partie filetée, pour éviter les phénomènes

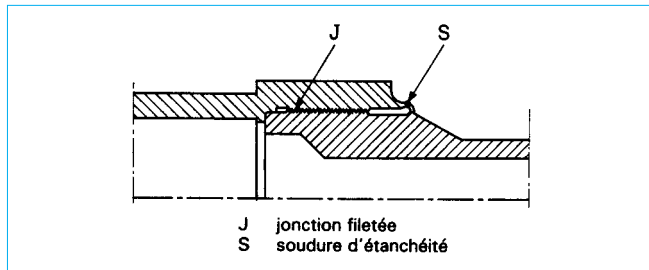


Figure 4 – Jonction filetée soudée

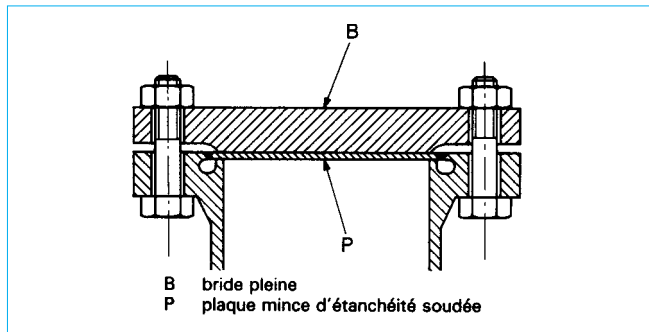


Figure 5 – Obturation par double plaque

nes de rétreint qui rendent le dévissage difficile. On doit donc prévoir une large gorge au droit de soudure qui facilite aussi le tronçonnage (figure 4).

Des astuces permettent des économies, telle par exemple la fermeture avec étanchéité rigoureuse d'un grand réservoir, réalisée par une plaque mince soudée sur la bride du réservoir, qui a été munie du côté interne d'une gorge, la plaque étant appuyée ensuite sur le couvercle épais qui tient la pression (figure 5).

5.2 Étanchéité relative

La disposition de deux surfaces appuyées l'une sur l'autre, même avec un effort important, ne conduit qu'à une étanchéité relative. En effet, toute surface comporte des défauts de fabrication, défauts de forme (ou macrodéfauts), défauts de surface proprement dits (microdéfauts ou rugosité). Tenter de limiter le nombre de ces défauts augmente toujours, parfois considérablement, le prix des pièces et il n'est jamais, malgré tout, possible de les supprimer totalement. Ces défauts sont la source de fuites, peut-être très petites mais mesurables. En outre, deux surfaces assemblées, bien qu'il s'agisse de jonctions statiques, subissent des microdéplacements relatifs par suite des sollicitations auxquelles tout assemblage est soumis : effet thermique, simplement par la variation de la température ambiante, effet mécanique par réaction des autres composants, etc. Tous ces défauts et sollicitations sont la source de fuites.

5.2.1 Étanchéité sans joint

Il est possible d'obtenir des étanchéités avec des taux de fuite faibles, au mieux de l'ordre de $10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, directement par serrage des deux surfaces assemblées sous certaines conditions.

La première est celle d'avoir des surfaces de géométrie correctes mais surtout de faible rugosité, par exemple R_a de l'ordre de 0,2 μm .

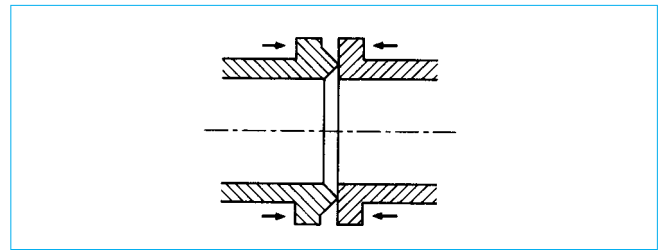


Figure 6 – Étanchéité couteaux-plan

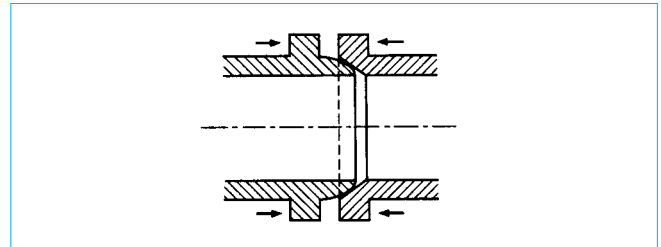


Figure 7 – Étanchéité cône-sphère

La pression de serrage doit être importante et est obtenue par une limitation de l'aire de contact d'une surface sur l'autre. Pour cela, les géométries des surfaces peuvent être du type couteaux-plan (figure 6), ou cône-sphère (figure 7).

Il est aussi intéressant que l'une des surfaces possède une dureté supérieure à l'autre de manière à faire pénétrer dans les défauts la matière la plus tendre, autant que cela est possible mais pratiquement jamais totalement.

Enfin, les assemblages n'auront que des dimensions réduites ; il semble en effet difficile d'obtenir une étanchéité de la classe de celle donnée ci-avant au-delà d'un diamètre de 80 mm.

Des raccords basés sur la jonction cône-sphère existent et donnent de bons résultats. Plus récemment, des raccords manchons en *alliages à mémoire* sont apparus : la jonction est du type cylindre sur cylindre et ils conduisent à une très forte pression de serrage ; malheureusement, la jonction est indémontable.

5.2.2 Étanchéité avec joint

Le joint permet une liaison de deux surfaces non parfaites et cela avec un degré d'étanchéité qui peut être très grand (taux de fuite inférieur à $10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

5.2.2.1 Propriétés d'un joint statique

Un joint doit posséder, pour assurer au mieux sa fonction, quatre propriétés. Il doit être :

- **élastique** pour suivre les variations dimensionnelles entre les surfaces à étancher sous l'action des différentes sollicitations et assurer en permanence un minimum d'effort de contact ;
- **plastique**, de manière à épouser au mieux les défauts de surface et en particulier ceux dus à la rugosité, sans toutefois fluer (figure 8) ;
- **impermeable** au fluide à étancher ;
- **compatible** avec le fluide, et cela dans toutes les conditions de fonctionnement.

Les deux premières propriétés sont peu compatibles et il faut en faire le meilleur compromis possible. Par ailleurs, l'effort de serrage pour assurer ces déformations élastiques et plastiques, exprimées souvent en effort linéaire de joint, avec pour unité le newton

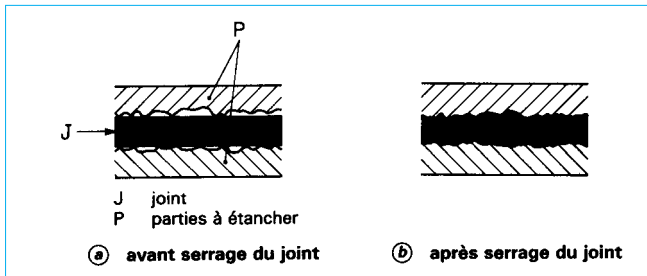


Figure 8 – Fonction d'un joint d'étanchéité

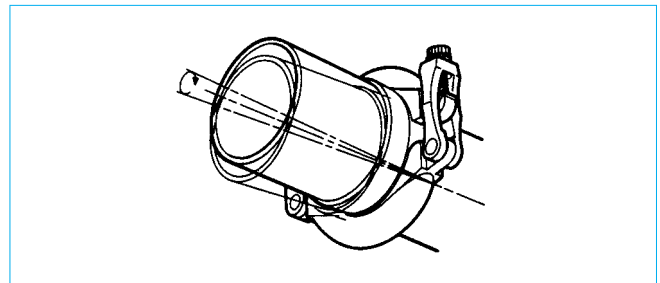


Figure 10 – Collier d'assemblage rapide

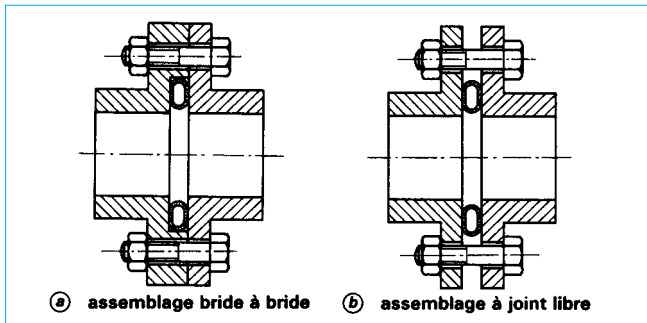


Figure 9 – Assemblage à brides boulonnées

par mètre ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$), doit être le plus faible possible pour que le dispositif de serrage soit simple, peu encombrant et de coût réduit.

5.2.2.2 Dispositifs de jonction

Il existe de nombreux types de dispositifs de serrage, les plus répandus étant les brides avec leurs très nombreuses variantes.

Du point de vue du joint, il existe deux types de montage :

- **bride à bride** ; le joint est placé dans une gorge, ou avec une couronne de limitation d'écrasement en parallèle avec lui ; l'écrasement du joint à la mise en place est donc limité à une valeur prédéterminée, tout effort supplémentaire passe ensuite directement d'une bride à l'autre (figure 9a) ;

- **libre** ; le joint est simplement placé entre les deux brides à faces planes ; quel que soit l'effort, il transite uniquement par le joint (figure 9b).

La déformation de l'assemblage est un paramètre important, spécialement dans le deuxième montage, et l'étanchéité de l'assemblage ne dépendra pas uniquement des qualités du joint mais de l'ensemble.

Le premier montage (figure 9a) est intéressant car il ne nécessite pas de précautions spéciales au montage ; de plus, le joint est enfermé et les risques d'extrusion, ou simplement de fluage, sont limités. En revanche, il n'est plus possible d'augmenter le serrage en service, ce qui est faisable bien sûr avec le deuxième montage.

Le serrage des deux montages, lui-même, peut être assuré par tous les procédés connus : vis, boulons, collier (figure 10), serrage hydraulique et pneumatique, serrage thermique, etc.

5.2.2.3 Comportement d'une liaison d'étanchéité avec joint

Un joint n'a pas une caractéristique effort-écrasement linéaire, à température constante. En effet, sa caractéristique peut être considérée comme la somme d'une composante élastique, réversible, généralement linéaire et d'une composante plastique pratiquement irréversible (figure 11).

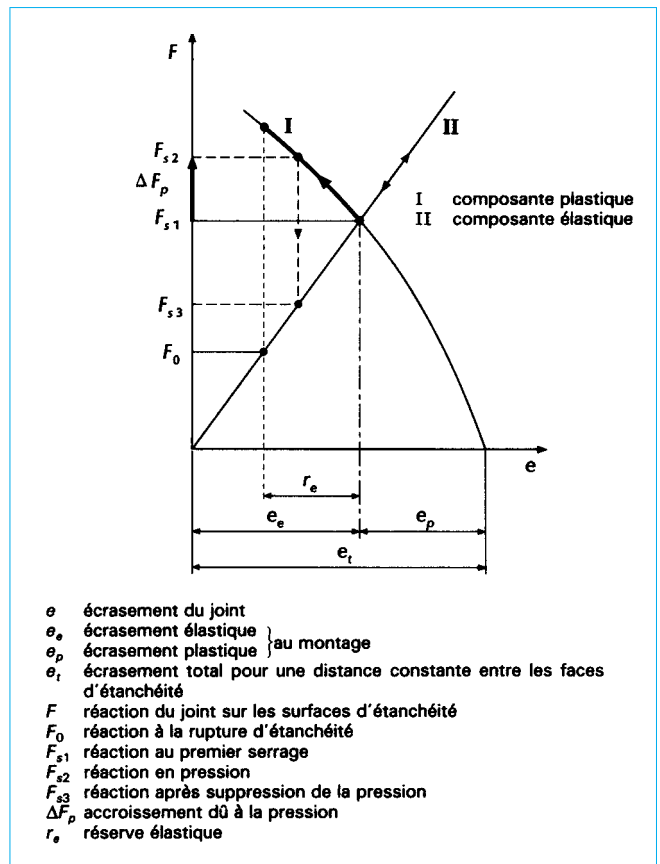


Figure 11 – Diagramme des deux composantes caractéristiques d'un joint d'étanchéité statique

Pour qu'un joint assure une étanchéité, avec une valeur minimale déterminée de fuite, il est nécessaire qu'il soit comprimé d'une certaine valeur, entre les deux surfaces à étancher, donc qu'elles exercent sur le joint deux effort égaux et symétriques F_1 ; le joint lui-même assure des réactions égales et opposées. Si une pression est mise dans l'assemblage, cette dernière va induire dans le joint de nouveaux efforts (figure 12) :

- une réaction radiale ΔF_r qui tend à chasser le joint vers l'extérieur (si la pression est intérieure) ;
- deux réactions axiales ΔF_p égales et symétriques qui s'ajoutent aux réactions dues au serrage initial ; ces réactions sont sensiblement proportionnelles à la pression.

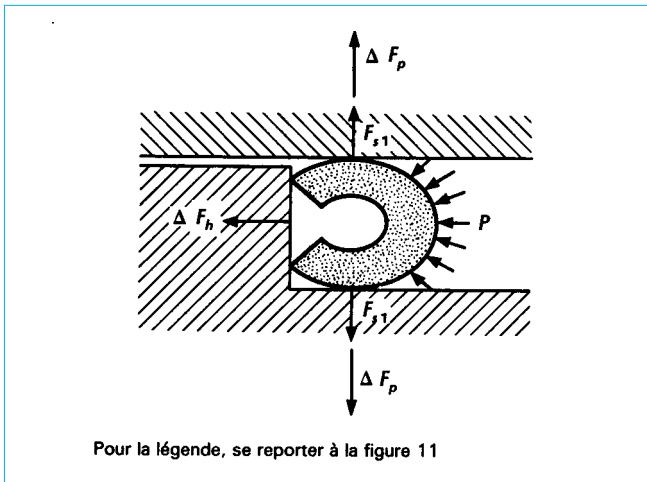


Figure 12 – Action de la pression P sur un joint comprimé : forces mises en jeu

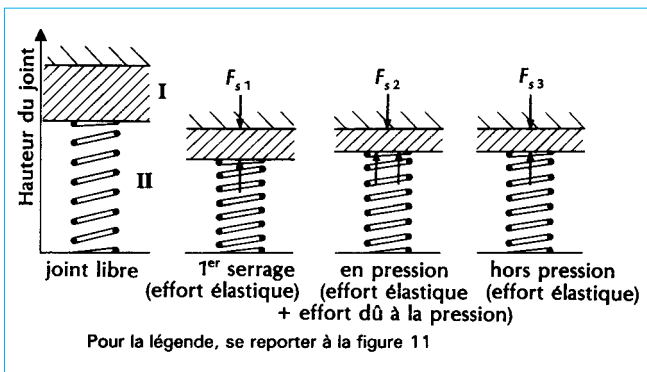


Figure 13 – Schématisation des deux composantes caractéristiques d'un joint d'étanchéité

La première mise en pression augmente donc le serrage du joint en assurant une plus grande *indentation* de la composante plastique ; elle est généralement favorable à l'étanchéité. Toutefois, cette augmentation de l'écrasement de la composante plastique va se traduire, après suppression de la pression, pour une même valeur de hauteur totale du joint, par une diminution des réactions du joint sur ses portées, réactions données par la composante élastique puisque cette partie sera moins écrasée (figure 13).

La figure 11 traduit ce résultat sur les caractéristiques décomposées d'un joint. Si les réactions sont inférieures à la valeur minimale assurant l'étanchéité demandée, il y aura fuite. Celle-ci peut être parfois éliminée par un resserrage, si l'assemblage n'est pas du type bride à bride.

Il est donc nécessaire que toute la réserve élastique ne soit pas consommée lors du premier serrage et même après mise en pression. En particulier, si la température augmente, la composante plastique va absorber plus d'élasticité par suite principalement du fluage. La possibilité de resserrage, si elle existe, risque alors d'être inefficace.

Plus cette réserve est grande, meilleure est la qualité du joint. La caractéristique générale d'un joint englobant ces deux composantes est donnée par la figure 14. Cette caractéristique varie en fonction de la température.

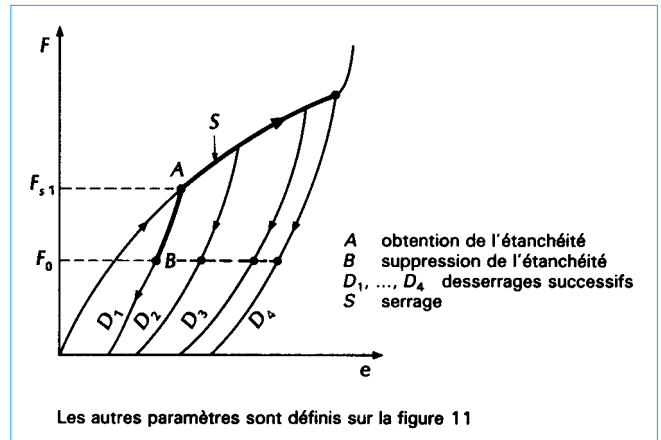


Figure 14 – Caractéristiques d'un joint d'étanchéité

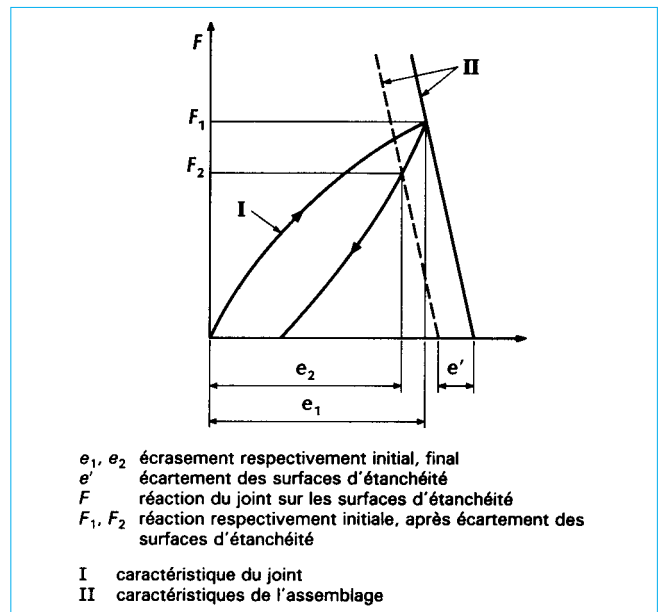


Figure 15 – Diagramme joint d'étanchéité - assemblage sous sollicitation

La liaison d'étanchéité est constituée par le joint et l'assemblage. Il faut donc aussi tenir compte de la caractéristique de déformation de ce dernier. Cette courbe est en principe une droite, l'assemblage étant calculé pour rester dans le domaine élastique. La conjugaison de la caractéristique de l'assemblage avec celle du joint permet d'étudier l'assemblage en étanchéité pour diverses sollicitations (figure 15).

Si des sollicitations tendent à éloigner les deux surfaces à étancher par suite de l'effort qu'elles engendrent dans le dispositif de maintien, le joint aura donc un écrasement moindre et sa réserve élastique devra lui permettre, malgré la réaction supplémentaire qui lui est associée, de maintenir une réaction totale suffisante pour assurer l'étanchéité (figure 15).

La température influe énormément sur les caractéristiques de la liaison. Les caractéristiques du joint et de l'assemblage diminuent beaucoup lorsque la température s'élève (souvent aussi lorsqu'elle

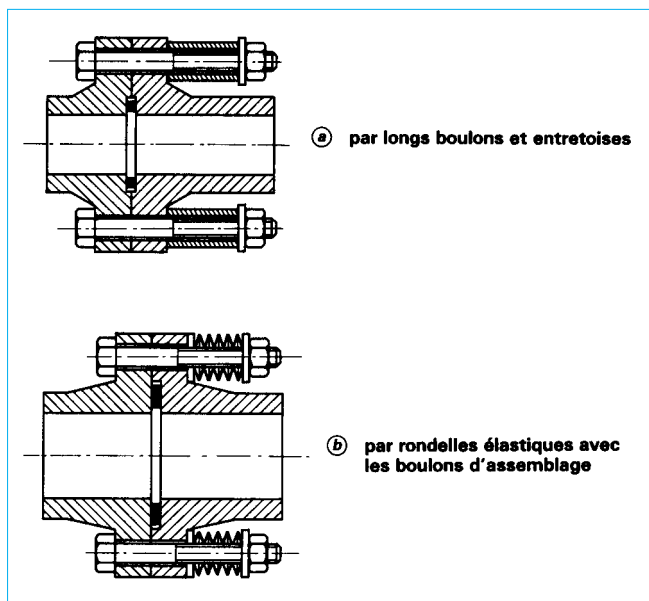


Figure 16 – Amélioration de la conservation de l'effort de serrage

diminue par rapport à l'ambiante). Il est possible d'améliorer la caractéristique de l'assemblage en lui permettant d'exercer un serrage relativement constant, par l'utilisation de boulons plus longs (figure 16a) ou par celle de rondelles élastiques (figure 16b).

Le phénomène de fluage, qui existe toujours plus ou moins dans un joint, se traduit d'ailleurs, à température ordinaire, par une diminution lente de l'effort de réaction sur les portées d'étanchéité après serrage d'un joint, mais qui arrive à se stabiliser. Cette baisse, avec certains types de joints (en élastomère), est peu sensible et ne dépasse pas quelques pour-cent. Elle peut être nettement plus élevée (jusqu'à 30 %) dans les joints métalliques ou dans les joints en plastiques composites. L'augmentation de température aggrave considérablement le fluage et souvent la stabilisation n'existe plus.

L'étude d'une liaison d'étanchéité est un problème complexe mais qui est soluble si l'on connaît bien les caractéristiques du joint et de l'assemblage sous les diverses sollicitations auxquelles ils sont soumis. Malheureusement, celles des joints sont souvent encore mal déterminées, ce qui rend le fonctionnement assez empirique.

5.2.2.4 Matériaux pour joints statiques

Les matériaux pour joints doivent posséder les meilleures qualités possibles (§ 5.2.2.1). Le produit de leur module d'élasticité E par leur résistance plastique σ_p doit être minimal, pour assurer une force de serrage faible, tout en possédant de plus une bonne résistance au fluage. Les matériaux doivent aussi être imperméables, au moins au fluide à étancher, et non agressés par lui aux températures extrêmes d'utilisation.

Des matériaux possèdent un assez faible module d'élasticité mais une résistance plastique assez élevée, pour d'autres c'est l'inverse. Dans de nombreux joints d'étanchéité, deux matériaux, voire plus, seront utilisés pour assurer des performances optimales : ce sont les joints composites, mais ils sont généralement plus onéreux que les joints mono-matériau.

Le nombre de matériaux utilisés pour réaliser des joints d'étanchéité est assez réduit ; ces matériaux appartiennent à des familles bien définies, surtout celles des élastomères, des matières plastiques et des métaux.

5.2.2.4.1 Élastomères

Les élastomères sont les matériaux qui possèdent, et de loin, le plus faible produit $E\sigma_p$. De plus, leur tenue au fluage est assez bonne et les différentes qualités font qu'il est presque toujours possible d'en trouver un qui convienne au fluide à étancher. Leur défaut est principalement une très légère perméabilité ; c'est pourquoi on ne les emploie que pour des dispositifs n'exigeant pas des taux de fuite inférieurs à 10^{-6} ou 10^{-7} Pa · m³ · s⁻¹. Par ailleurs, les élastomères les plus performants sont limités à une température de service en continu de 230 °C. De plus, ils présentent un certain vieillissement (mais des progrès importants permettent actuellement des durées de vie supérieures à 10 ans pour certains) et une variation de volume, le plus souvent positive, sous l'action du fluide à étancher, qui peut être gênante.

Malgré cela, les élastomères constituent les meilleurs matériaux d'étanchéité, conduisant à des efforts de serrage faibles, de l'ordre de $0,5 \times 10^3$ à 5×10^3 N · m⁻¹, sur des liaisons qui peuvent être très fortement sollicitées en pression ou en efforts divers.

De nombreuses familles d'élastomères sont utilisées en matériaux d'étanchéité, mais trois sont d'un emploi très fréquent :

- l'élastomère nitrile, très courant en mécanique, possédant une excellente tenue aux huiles minérales et de bas prix ;
- l'élastomère silicone, ayant une très bonne tenue à une plage élevée de température (de -70 à +300 °C en pointe), ayant une bonne résistance chimique, mais de prix nettement plus élevé ;
- les élastomères fluorés, les plus récents, ayant des qualités très complètes, une très grande inertie chimique, une gamme de températures d'utilisation étendue (-50 à +230 °C), mais de prix élevé.

Le tableau 3 donne les principales propriétés des élastomères utilisés dans 95 % des applications de l'étanchéité.

La caractéristique fondamentale d'un élastomère pour les joints d'étanchéité, outre sa famille, est la dureté. Une dureté importante (supérieure à 90 Shore) assure une meilleure résistance et sera utilisée pour des pressions élevées (supérieures à 20 MPa), mais l'effort de serrage sera plus important qu'avec une dureté moindre et surtout la rugosité R_a des surfaces devra être assez faible, par exemple inférieure à 1 µm.

Des propriétés intéressantes, mais secondaires, sont la déformation rémanente après compression et la résistance au gonflement en présence de liquides.

5.2.2.4.2 Matières plastiques

Deux familles de matières plastiques sont utilisées en matériaux pour joints d'étanchéité statiques :

- les **polyamides**, qui ont une très bonne résistance mécanique et qui sont assez inertes chimiquement ; ils ont un fluage modéré et sont de prix peu élevé ; leur tenue en température est très médiocre, inférieure à 100 °C ;
- les **PTFE** [poly (tétrafluoréthylène)], qui ont une très grande résistance aux produits chimiques dans une gamme étendue de température (-200 à +280 °C), mais qui ont un prix élevé et présentent un fluage important.

Ces matériaux, beaucoup plus durs que les élastomères (§ 5.2.2.4.1), nécessitent des pressions de serrage assez élevées, de l'ordre de 2×10^4 N · m⁻¹. Les surfaces à étancher doivent avoir une rugosité R_a faible, le plus souvent inférieure à 0,5 µm.

Leur imperméabilité est bonne et ils sont utilisés surtout pour les pressions très importantes (jusqu'à 50 Mpa), soit directement comme joint, soit comme auxiliaire avec les élastomères (bague anti-extrusion).

5.2.2.4.3 Métaux

On distingue deux catégories de métaux (tableau 4) :

- les **métaux mous**, essentiellement l'étain, le plomb, l'aluminium, voire le cuivre recuit, l'argent, l'or, l'indium (ce dernier pour les joints utilisés dans les techniques du vide) ;

Tableau 3 – Principaux élastomères utilisés en étanchéité

| Famille d'élastomère | Désignations ASTM et ISO | Intervalle de dureté Shore | Température maximale en service °C | Température maximale de pointe °C | Applications | Inconvénients | Noms commerciaux |
|-------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|---|--|---|
| Butadiène acrylonitrile | NBR | 40 à 95 | - 30 à + 100 | 140 | Produits pétroliers, liquides ou gazeux (huiles, carburants, graisses, butane, propane). Air comprimé. Eau froide. Eau chaude jusqu'à 80 °C. Très bonne résistance aux huiles minérales | Faible résistance aux déchirements | <i>Perbunan Hycar Bréon Butakon Elaprim Butacril Krynac</i> |
| Éthylène-propylène | EPDM EP, E/P | 45 à 85 | - 45 à + 150 | 170 | Eau chaude et vapeur, jusqu'à 170 °C. Glycols. Produits chimiques minéraux, acides, bases. Résistance aux intempéries, à l'ozone. Tenue aux radiations | Très mauvaise tenue aux huiles | |
| Polychloroprène | CR | 40 à 90 | - 25 à + 100 | 120 | Résistance aux intempéries, à l'ozone. Bonnes caractéristiques diélectriques | Résistance moyenne aux huiles et aux déchirements | <i>Néoprène</i> |
| Polyisobutylène | IIR, PIB | 45 à 85 | - 25 à + 100 | 130 | Résistance aux intempéries. Faible perméabilité aux gaz | Faible résistance aux huiles et à la rupture | |
| Polyacrylique | ACM | 60 à 75 | - 10 à + 110 | 150 | Huiles hypoides (additifs souffrés) | Très mauvaise résistance à l'eau et à la vapeur | |
| Poly(styrène/butadiène) | SBR S/B | 30 à 95 | - 40 à + 80 | 100 | Bonne résistance à l'abrasion, aux déchirements et à la traction | Faible résistance aux huiles | |
| Silicone | VSI SI | 40 à 80 | - 80 à + 250 | 300 | Résistance aux intempéries, à l'ozone. Résistance à l'air chaud. Applications alimentaires. Excellentes caractéristiques diélectriques | Faible résistance mécanique. Prix assez élevé. Faible perméabilité | |
| Silicone fluoré | FVMQ | 60 à 80 | - 50 à + 180 | 200 | Résistance aux intempéries, à l'ozone. Résistance à l'air chaud. Bonne résistance aux produits pétroliers. Excellentes caractéristiques diélectriques | Assez faible perméabilité. Prix élevé | |
| Fluoré | FKM | 65 à 85 | - 20 à + 220 | 250 | Acides forts et acides oxydants. Produits pétroliers, hydrocarbures aromatiques. Fluides hydrauliques ininflammables. Produits chimiques divers. Bonne tenue à la chaleur. Résistance exceptionnelle au fluage | Prix élevé | <i>Viton Fluorel Tecnoflon</i> |
| Polyuréthane | AU, EU, PUR | 70 à 98 | - 40 à + 80 | 100 | Grande résistance à l'usure, à l'abrasion et à la coupure | Faible résistance à la chaleur et à l'humidité | <i>Vulkollan Urepan Adiprene Estane Desmopan</i> |

— les **métaux durs** mais à fort coefficient d'élasticité, surtout le nickel et ses alliages, l'acier inoxydable, l'*Inconel*, etc.

Les premiers sont utilisés pour leurs propriétés de plasticité, mais ils fluent souvent facilement ; les seconds sont utilisés pour leur élasticité et leur bonne tenue aux températures élevées (ou très basses).

L'emploi des métaux conduit à des joints complètement imperméables, permettant des services à des températures extrêmes (800 °C et plus), mais les efforts de serrage sont toujours élevés nettement supérieurs à $10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ et nécessitent des surfaces avec une faible rugosité ($R_a = 0,4 \mu\text{m}$ au maximum). De plus, leur tenue sous de fortes sollicitations est difficile.

5.2.2.4.4 Autres matériaux

● **Amiante** : c'est une fibre très réfractaire qui n'est jamais utilisée seule mais surtout en association avec les élastomères, dont elle va augmenter la dureté, la résistance mécanique et la tenue au fluage. Associée à des métaux, pour constituer les joints métaloplastiques, elle permet d'en augmenter l'élasticité.

● **Cellulose** : sous forme de papier, souvent paraffiné, de carton plus ou moins évolué, elle est utilisée pour des joints surtout en contact avec les liquides dans des conditions modestes de pression et de température (10^5 Pa , 50 °C au maximum).

● **Carbone** : sous forme de fibres de graphite, parfois tissées, se présentant sous la forme d'un papier, il permet des utilisations à des températures élevées (600 °C et plus), avec une très bonne inertie chimique. Les joints sont relativement souples mais, du fait de leur structure, l'étanchéité est assez faible ($10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$).

● **Céramique** : également sous forme de fibres, elle permet une température d'utilisation très élevée (1 000 °C), une bonne résistance chimique mais une étanchéité semblable à celle donnée pour les fibres de carbone.

5.2.2.5 Formes des joints statiques

Il existe une quantité considérable de formes de joints statiques, ce qui prouve d'ailleurs que le choix du meilleur joint n'est pas évident.

Tableau 4 – Principaux métaux utilisés dans les joints statiques

| Métal | Température limite °C | | | Tenue aux produits (1) | | | | | | | | | | | Appréciations Applications | | |
|-------|-------------------------------------|--------------------|-----|----------------------------|-----------------|-----------------|-----|---------------------------|---------------------------------|------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------|------------|-------------------------------|--------|--|
| | matériau de structure | en revê- tement | | NH ₃ liquide | CO ₂ | Fioul Diesel | HCl | H ₂ liquide | Matériau plastique fondue | HNO ₃ | O ₂ liquide | H ₂ SO ₄ | Eau déméralisée | Eau de mer | | Vapeur | |
| Mou | Étain | - 50 | 80 | 150 | A | B | | | | | | | | | | | Tenue assez correcte à la corrosion. Flue facilement. Domaine très limité en température |
| | Plomb | - 50 | 100 | 200 | A | C | A | C | A | | D | D | A | D | A | B | Flue facilement, tient mal en température. Tenue excellente avec les sulfates |
| | Aluminium | - 255 | 200 | 400 | B | B | | D | A | | B | A | | A | D | B | Tenue chimique acceptable avec des oxydants, produit à base de fluor |
| | Cuivre | - 255 | 300 | 450 | D | C | A | D | A | C | D | A | C | D | B | A | Convient très bien au vide. Résistance chimique médiocre sauf quelques exceptions |
| | Argent | - 200 | 400 | 650 | | B | A | D | A | A | D | A | D | | B | A | Très bonne tenue à des températures assez importantes. Bonne résistance chimique. Résistance au froid limitée |
| | Or | - 255 | | 750 | | A | A | D | A | A | D | A | D | | B | A | Très bonne résistance chimique. Gamme étendue de tenue aux températures positives et négatives |
| Dur | Fer | | 500 | | B | B | | D | A | | A | A | A | D | | | Peu utilisé, bonne tenue avec acide nitrique mais corrosion facile avec beaucoup de produits |
| | Nickel | - 200 | 700 | 850 | B | B | A | C | A | A | C | A | C | A | C | A | Très bien à haute température et surtout bonne tenue à la corrosion |
| | Inconel | | 820 | | B | B | A | C | A | A | C | A | C | | C | A | Bonne tenue à la corrosion et aux températures élevées |
| | Acier inoxydable austénitique | | 870 | | A | B | A | C | A | A | C | A | C | A | A | A | Bonne tenue à la corrosion (sauf avec les chlorures) et à température élevée, dépend de la nuance |

(1) A bon ; B moyen ; C faible ; D à interdire.

Certains présentent un intérêt particulier et doivent être choisis de préférence.

Pour une forme bien étudiée, il est possible d'améliorer la courbe caractéristique d'un joint d'étanchéité statique, en particulier de lui donner une meilleure composante élastique. Si deux matériaux sont utilisés (joints composites), on fait remplir à chacun la fonction pour laquelle il est le mieux adapté, par exemple plasticité pour un matériau mou, élasticité pour un matériau à résistance élevée.

5.2.2.5.1 Joints plats

Ce sont les plus simples. Découpés dans une feuille, ils peuvent avoir une surface quelconque.

Ces joints sont réalisés en élastomère ou en élastomère-amianté (le plus utilisé), en matière plastique, en composé métaloplastique de différentes réalisations (figure 17) et en feuille de métaux.

Ce type de joint n'est pas très intéressant, sauf pour les surfaces à étancher compliquées. En général, il vaut mieux lui préférer le joint torique.

La largeur du joint ne doit pas être trop importante, les constructeurs donnent toutes précisions à ce sujet.

Il y a toujours intérêt à prévoir un serrage précis, qui nécessite au minimum l'utilisation de la clé dynamométrique ou un montage avec écrasement sur butée.

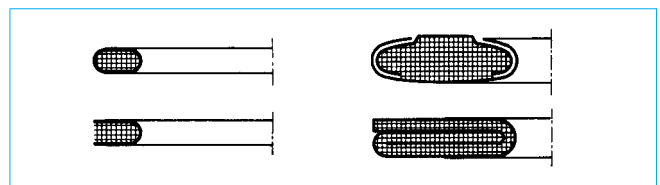


Figure 17 – Joints plats métaloplastiques

5.2.2.5.2 Joints toriques

Un joint torique est un anneau de section généralement circulaire. L'élastomère est le matériau le plus courant pour sa confection. Ce joint présente de nombreux avantages : faible encombrement, effort de serrage très faible, autoétanchéité. En effet, la pression qui s'exerce sur ce type de joint tend à lui donner une forme qui renforce son contact sur les surfaces à étancher.

Sa fabrication en grande série, en des dimensions très variées, et son faible prix en font le joint statique par excellence.

Plusieurs montages sont possibles, donnés par la figure 18.

Le montage en angle (figure 18a) ou avec trois points de contact est intéressant, mais il est nécessaire de bien respecter les cotes d'usinage, en particulier de la partie oblique.

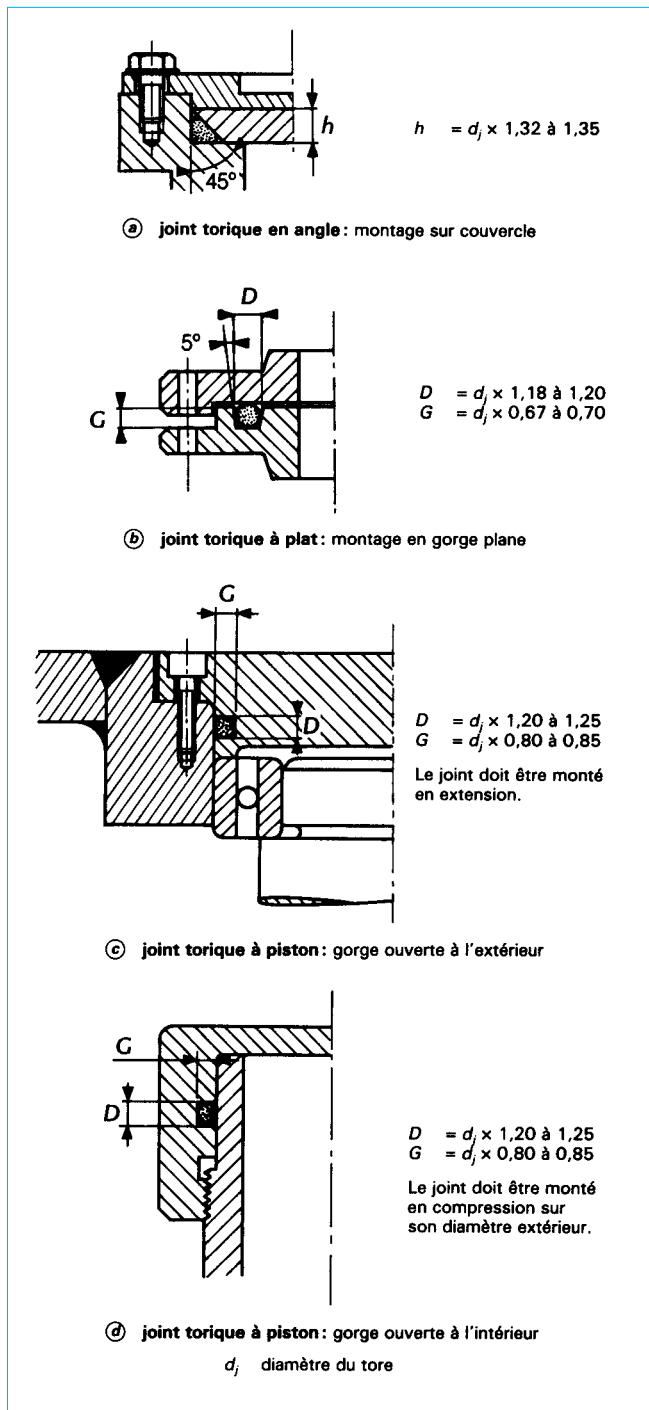


Figure 18 – Montages de joints toriques

Le montage en gorge plane (figure 18b) est universel et permet des pressions très élevées.

Le montage en piston (figure 18c et d) présente quelques inconvénients. Par suite du jeu nécessaire au montage, il peut y avoir risque d'extrusion du joint, la pression est donc limitée aux environs

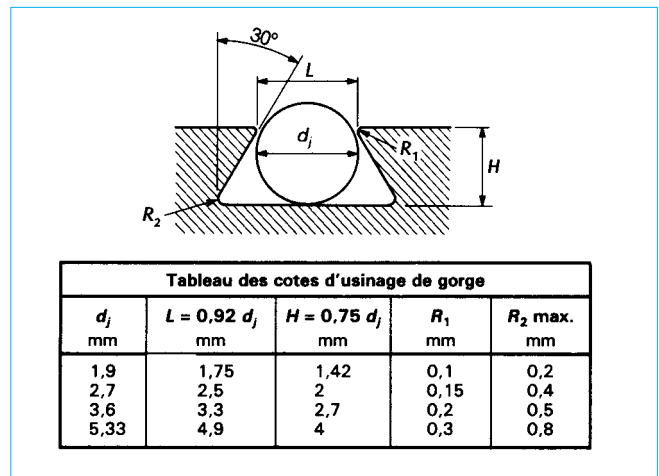


Figure 19 – Montage d'un joint torique dans une gorge trapézoïdale

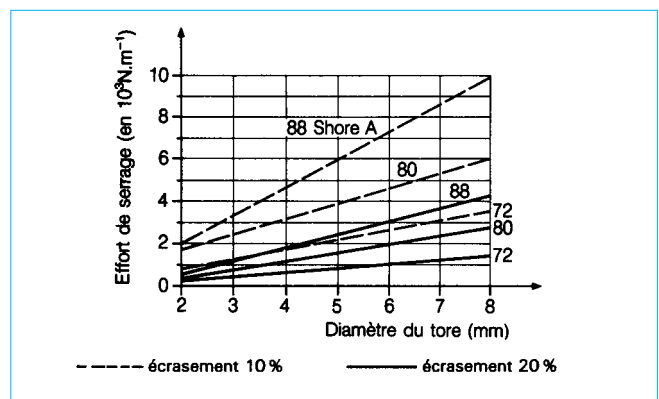


Figure 20 – Effort d'écrasement linéaire d'un joint torique en élastomère NBR

de 20 MPa. De plus, un chanfrein d'entrée est nécessaire pour éviter une blessure du joint au montage.

Il est possible de réaliser une gorge trapézoïdale qui permet de maintenir le joint au montage. Les dimensions sont celles de la figure 19. Les efforts d'écrasement sont donnés par la figure 20.

Les rugosités de surface R_a sont comprises entre 0,6 et 1,6 μm suivant la dureté de l'élastomère, un élastomère dur nécessitant la rugosité la plus faible.

Il existe aussi des joints toriques métalliques (figure 21). Certains sont creux, la paroi du tore mince assure une relative élasticité. Parfois des trous, côté pression, permettent à cette dernière de venir renforcer l'effort de serrage initial. D'autres contiennent un gaz sous pression qui, sous l'effet de la température, se dilate et augmente l'effet de la pression à étancher.

Ces joints nécessitent un état de surface R_a très fin, de rugosité inférieure à 0,2 μm . Ils reçoivent souvent un revêtement extérieur en métal mou. Leur utilisation, surtout pour des températures supérieures à 200 °C, est délicate, les conditions de montage, propreté et valeur de l'effort de serrage, étant très strictes.

Des joints toriques métalliques massifs à section circulaire ou ovoïde (figure 22) sont aussi utilisés mais avec des gorges trapézoïdales. Le rapprochement des gorges au serrage assure une pression très élevée entre joint et surface, et l'étanchéité obtenue est

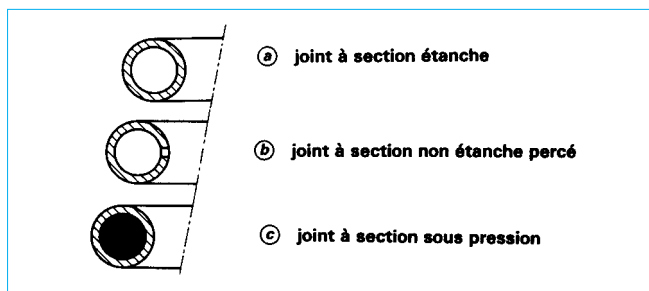


Figure 21 – Joints toriques métalliques creux

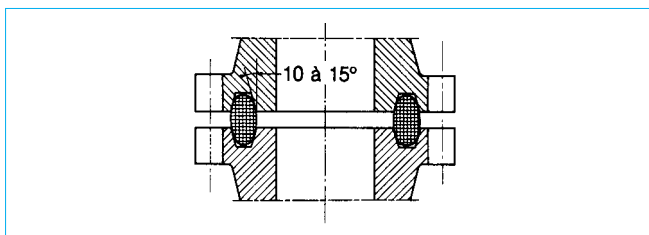


Figure 22 – Joint métallique massif torique à section ovoïde

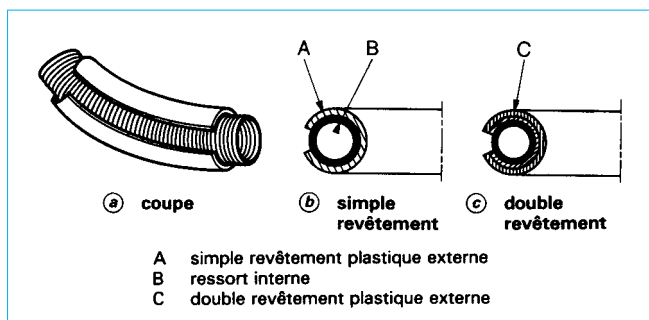


Figure 23 – Joint métallique composite à ressort (d'après doc. Céfilac)

assez bonne, même avec des états de surface nettement moins fins que pour les joints toriques métalliques creux. Enfin, il existe un joint torique composite intéressant, dont le corps central est un ressort hélicoïdal à spires jointives fermé sur lui-même, enveloppé extérieurement d'une feuille métallique (joint *Hélicoflex* de Céfilac ; figure 23). Le ressort assure une bonne élasticité, l'enveloppe extérieure donne la plasticité, qui peut être améliorée par l'utilisation de deux feuilles l'une sur l'autre, la plus extérieure étant la plus plastique. Le ressort est réalisé avec un fil d'acier inoxydable austénitique, en *Monel*, *Inconel* ou *Nimonic* suivant la température d'utilisation qui peut aller jusqu'à 800 °C.

Les revêtements extérieurs sont :

- le plomb, l'étain ou l'indium avec des rugosités de surface R_a comprises entre 0,1 et 1,6 μm pour la température ambiante (20 à 30 °C) ;
- l'aluminium très courant, jusqu'à 250 °C, la rugosité R_a doit être comprise entre 0,8 et 12,5 μm ;
- l'argent et le cuivre ; la rugosité R_a doit être comprise entre 0,2 et 6,3 μm , jusqu'à la température de 400 °C ;
- le nickel et l'acier inoxydable ; la rugosité R_a doit être comprise entre 0,1 et 3,2 μm , jusqu'à la température de 700 °C.

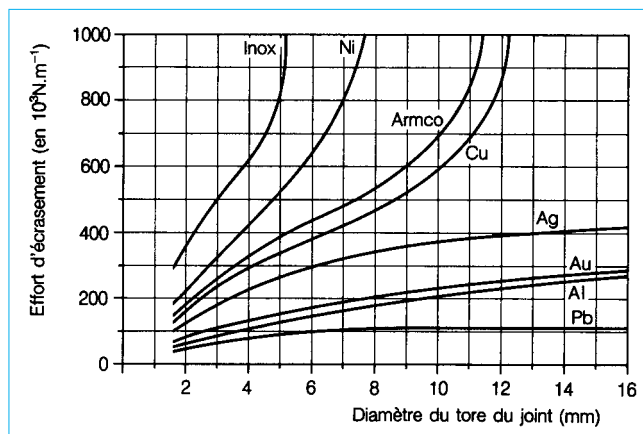
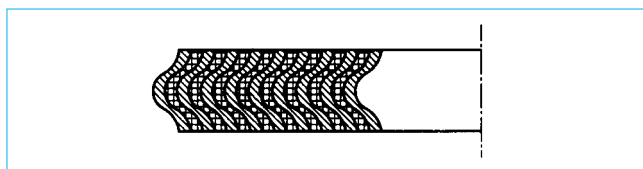
Figure 24 – Effort d'écrasement d'un joint métallique composite à ressort (joint *Hélicoflex*)

Figure 25 – Joint métaloplastique chevron

La fuite peut être inférieure à $10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. L'effort de serrage est assez important, mais inférieur à celui de beaucoup d'autres joints métalliques. Un ordre de grandeur est donné sur la figure 24 en fonction de la nature du revêtement extérieur et du diamètre du tore. L'élasticité est de l'ordre de 10 % du diamètre de la section du joint.

5.2.2.5.3 Joints de formes diverses

● **Joint chevron** (figure 25) ou **joint spiral** : il s'agit d'un joint réalisé à partir d'une section en chevron enroulée en spirale et intercalant un ruban, généralement d'amiante. La forme en V et la présence d'un matériau assez tendre assurent une certaine élasticité. Ce joint, qui permet d'assurer l'étanchéité à des pressions élevées (20 MPa et plus), nécessite un effort de serrage très grand (5×10^5 à $10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$).

● **Joint lettre** (figure 26) : la section usinée a des formes variées reproduisant certaines lettres de l'alphabet (C, K, U, V, X, etc.). Ces joints possèdent une petite élasticité et les parties en contact avec les surfaces à étancher reçoivent souvent un dépôt de métal mou. Ces joints sont très chers et peu intéressants.

● **Joint métaloplastique ondulé** (figure 27) : pour assurer une meilleure élasticité, la section du joint est ondulée. L'étanchéité est assez bonne avec les liquides, faible avec les gaz.

● **Joint couteaux** : il en existe deux variantes. Le joint peut posséder des surfaces de formes très aiguës pour celles qui vont assurer l'étanchéité (figure 28), ou bien ce sont les surfaces à étancher qui vont présenter des formes aiguës (couteaux de formes variées figure 29), et venir s'imprégner dans le joint plus tendre. Les matériaux utilisés sont le cuivre, l'aluminium, le nickel, voire l'or ou l'argent. Ce type de joint est assez courant dans les installations de grand vide.

● **Joint conique** : ce joint a une section en tronc de cône, d'épaisseur relativement faible (1 à 3 ou 4 mm), en acier inoxydable (*Monel*, *Inconel*) et en aluminium (dans le cas des très basses températures). Il est placé dans un logement en forme de double V

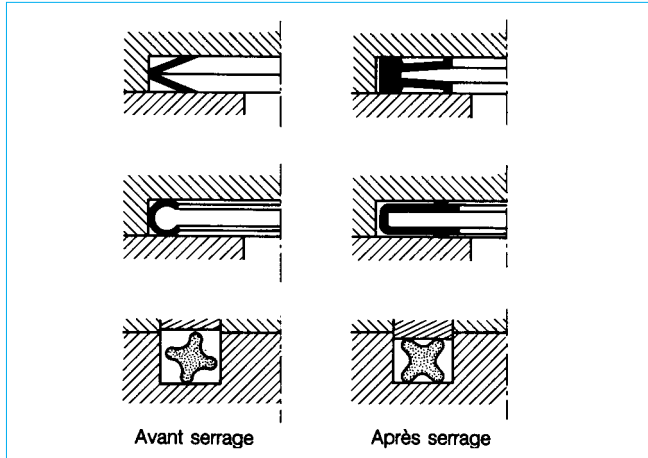


Figure 26 – Joints métalliques en forme de lettres

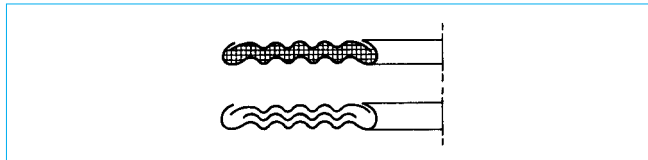


Figure 27 – Joints métalloplastiques ondulés

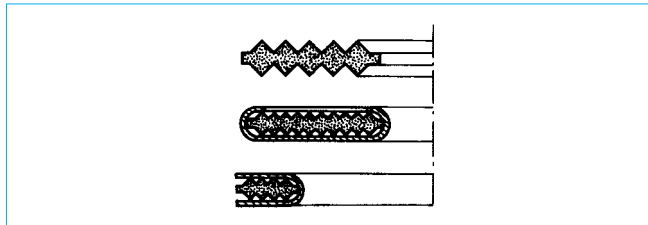


Figure 28 – Joints couteaux

(figure 30). Une variante très intéressante (figure 31) utilise une forme tronconique légèrement ondulée, le logement est asymétrique.

Les efforts de serrage sont relativement modérés pour un joint métallique tout en assurant une excellente étanchéité (fuite inférieure à $10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), sous très forte pression ou sous grand vide, malgré des sollicitations thermiques importantes.

- **Joint à élasticité induite** (figure 32) : il est constitué par deux rondelles métalliques entre lesquelles est placé un métal relativement mou d'épaisseur un peu supérieure à celle des rondelles. Le serrage assure une déformation élastique radiale des rondelles dès que ce métal mou est comprimé et ramené à l'épaisseur des rondelles. Plusieurs variantes de réalisation existent. Sa restitution élastique reste toutefois assez faible.

5.2.2.5.4 Joint gonflable

Ce joint a la forme d'un boudin creux en élastomère muni d'une valve par laquelle peut être injecté un gaz sous pression, qui va faire augmenter sa dimension et le faire s'appliquer sur la deuxième surface à étancher (figure 33). Sa section a des formes variables. Sa décompression assure la suppression du contact, ce qui permet des démontages faciles. Ce type de joint n'assure

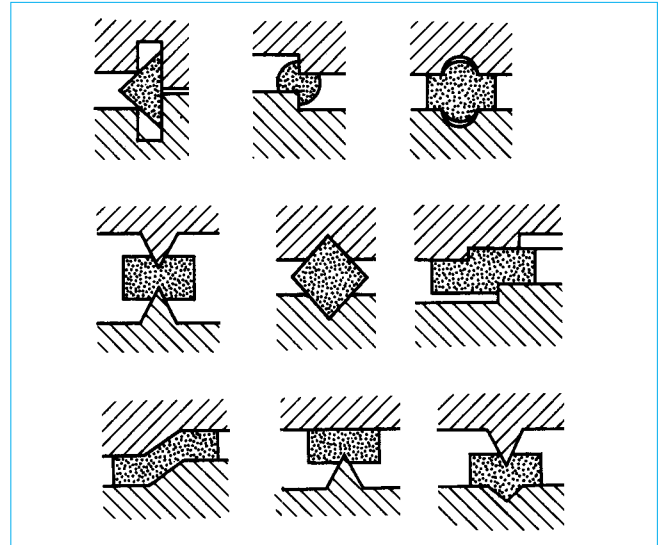


Figure 29 – Surfaces d'étanchéité type couteaux

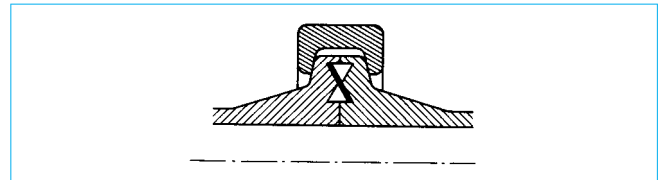


Figure 30 – Joint conique

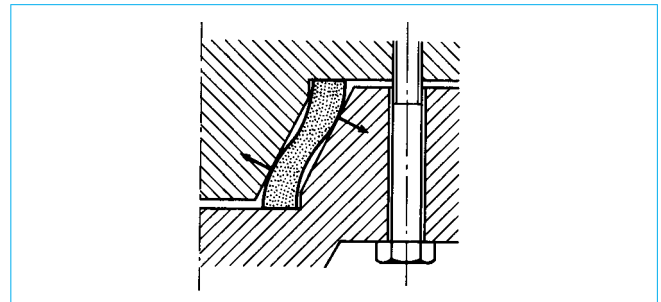


Figure 31 – Joint conique en S

cependant pas de très grandes étanchéités, ni des pressions élevées (quelques 10^5 Pa au plus).

5.2.2.5.5 Conclusion

Le tableau 5 résume les différents types de joints d'étanchéité statique les plus intéressants avec leurs principales caractéristiques.

5.2.2.6 Difficultés rencontrées

Les fuites que l'on constate dans les dispositifs comportant des joints statiques se manifestent de deux manières différentes en fonction du temps :

- la fuite a lieu immédiatement lors de la mise en service, ou après un remontage ;
- la fuite apparaît après un certain temps de fonctionnement.

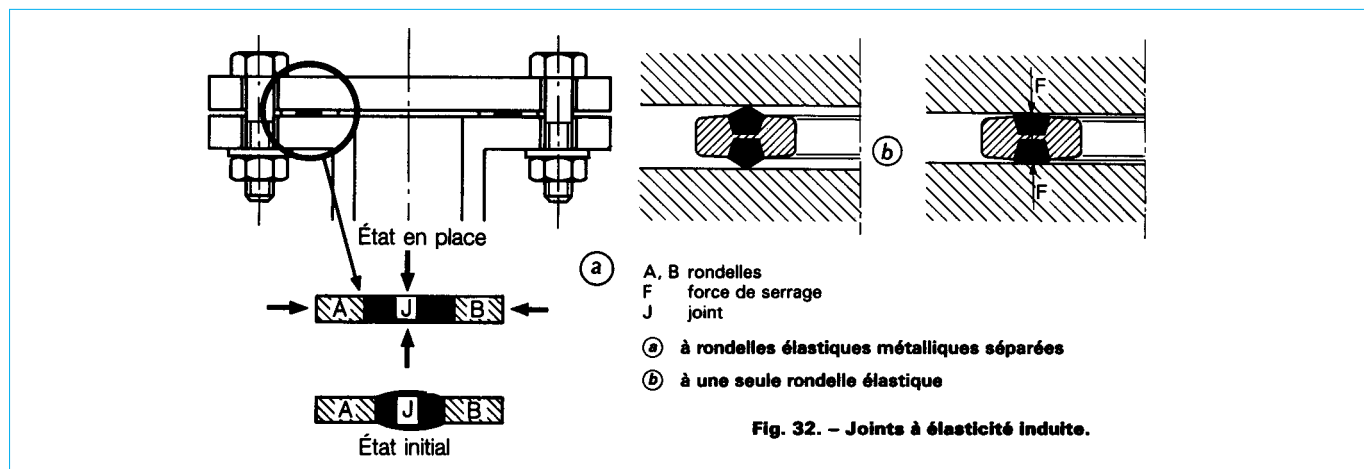


Fig. 32. – Joints à élasticité induite.

Figure 32 – Joints à élasticité induite

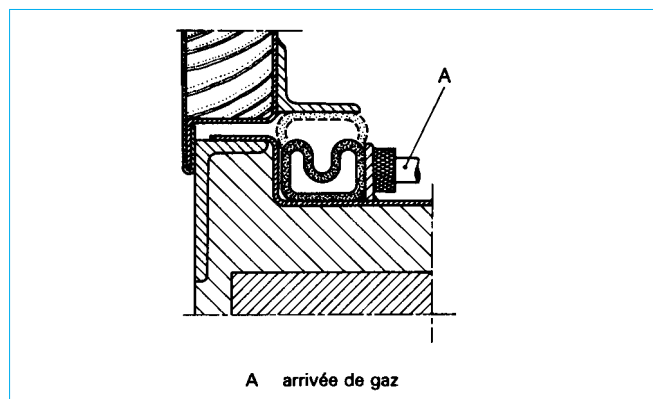


Figure 33 – Joint gonflable

Il existe des causes communes à l'apparition de ces deux types de fuites, mais certaines sont bien particulières à chacun.

5.2.2.6.1 Fuite dès la mise en service

Les causes peuvent être dues à :

- un mauvais choix du joint ;
- une agression chimique du matériau du joint par le fluide ;
- une détérioration du matériau du joint par la température trop haute, ou trop basse du fluide.

Toutefois, la fuite peut n'apparaître qu'au bout d'un certain temps, à moins que le matériau ait été très mal choisi :

- **perméabilité trop grande** : cela est surtout le cas avec le vide ou avec des gaz très légers (hélium, hydrogène entre autres) ;
- **plasticité insuffisante** : c'est une cause fréquente de fuite immédiate, surtout avec les gaz.

Les micro-déformations sont alors mal comblées : **liaison mal adaptée**. On distingue les causes suivantes :

- *rugosité trop importante des surfaces en contact avec le joint* ;
- *rayures radiales accidentelles* qui constituent un chemin de fuite direct ; ces rayures peuvent être dues à des coups d'outils ou

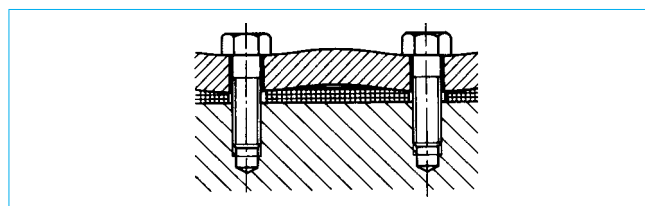


Figure 34 – Cause de fuite par serrage non uniforme

à des chocs lors de la fabrication ou lors du montage ; c'est une cause très fréquente ;

– *serrage insuffisant* (ou parfois trop important) et souvent irrégulier du joint ; il est indispensable que les organes de serrage assurent une pression linéaire constante ; ainsi, sur la figure 34, les boulons sont très éloignés et les surfaces à assembler se gauchissent, entraînant une fuite entre chacun d'eux ;

– *encastrement du joint insuffisant* : si sa résistance radiale est trop faible, il peut y avoir rupture du joint en extrusion, en particulier avec les élastomères, les matières plastiques, ou les métaux purs les plus mous ;

– *mauvais montage* : c'est aussi une cause fréquente de fuite. Le joint peut être *blessé* au moment du montage. En particulier avec les joints en élastomère, il est très important d'avoir des chanfreins d'entrée bien faits ; il ne faut pas faire passer le joint à force sur des filetages ou des trous, surtout si ces derniers sont mal chanfreinés ; il faut aussi veiller à n'introduire ni copeaux, ni particules, qui sont des sources importantes de fuites. Les surfaces à étancher doivent être propres, le plus souvent dégraissées, car nombre d'huiles ou de graisses attaquent certains matériaux de joints.

Ces cas de montages défectueux de joints se rencontrent souvent lorsque le joint travaille dans un plan horizontal et lorsqu'il doit être placé au préalable (ce qui est toutefois rare) dans la partie supérieure. Il y a lieu alors de trouver une solution pour bien le positionner et le fixer. C'est la raison de l'utilisation des gorges trapézoïdales avec les joints toriques en élastomères (figure 19).

De très nombreux joints, surtout les joints métalliques, ne peuvent guère servir plusieurs fois. Les joints en élastomère peuvent être réutilisés un assez grand nombre de fois, à condition que leur durée de vie ne dépasse pas 3 à 10 ans, suivant les qualités.

On remarque aussi des défauts d'étanchéité lorsqu'un joint en élastomère est remonté rapidement (de l'ordre de quelques minutes à une heure), et s'il a été comprimé pendant un temps assez

Tableau 5 – Joints les plus importants pour les étanchéités statiques (1)

| Forme de la section ou type | Schéma | Matériau | Force de serrage Ordre de grandeur en $10^3 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ | Température limite d'utilisation °C | Caractéristiques générales | Remarques Applications principales |
|-----------------------------|---------------------|--|--|---|---|---|
| Torique (§ 5.2.2.5.2) | circulaire plein | Élastomère Matière plastique (PTFE) | 1 à 5 | 250 | Simple, peu encombrant, prix faible, autoétanche Bonne résistance aux produits | Joint universel, gaz ou liquide. Usinage moyen des surfaces. |
| | | | 10 à 30 | 300 | | |
| | circulaire creux | Métal avec revêtement mou | 100 à 350 | 600 | Coûteux, usinage très soigné des surfaces | Plutôt pour liquide |
| | composite à ressort | Ressort acier, enveloppe métal plus ou moins mou | 80 à 1 000 | 700 | Bonne reprise élastique, usinage des surfaces moyen, prix moyen | Pour gaz ou liquide, sollicitations assez importantes, très bonne étanchéité |
| | ovale | Métal (gorges en V) | 200 à 600 | 400 | Reprise élastique faible, usinage des surfaces moyen | Surtout gaz, bonne étanchéité, brides épaisses |
| Plat (§ 5.2.2.5.1) | rectangulaire | Élastomère. Élastomère-amiante. Matière plastique (PTFE). Métal mou | 5 à 20 | 250 | Peu coûteux, bonne reprise élastique. Peu coûteux, peu de fluage. Risque de fluage, inertie chimique. Risque de fluage, peu coûteux. | Pour formes compliquées, gaz et liquide. Surtout pour liquide peu agressif. Liquide agressif. Risque de fluage, pression moyenne |
| | | | 30 à 200 | 350 | | |
| | métallo-plastique | Métal-amiante | 200 à 400 | 500 | Assez souple, prix assez faible | Étanchéité moyenne |
| À indentation (§ 5.2.2.5.3) | | Métal plus ou moins mou | 100 à 400 | 200 | Nécessite un usinage de bride très fin ou compliqué, prix assez faible, reprise élastique faible | Très bonne étanchéité, pour vide élevé, non réutilisable |
| Conique (§ 5.2.2.5.3) | | Métal | 150 à 400 | 800 | Bride pas trop épaisse, prix moyen, assez bonne reprise élastique | Très bonne étanchéité sous sollicitations importantes, forte pression, faible température |
| Gonflable (§ 5.2.2.5.4) | | Élastomère | 0 | 200 | Appui effaçable à distance, pression d'appui variable | Étanchéité médiocre, aucun effort au mouvement de mise en place |

(1) Les valeurs numériques correspondent aux cas les plus fréquents. Des valeurs supérieures peuvent parfois être obtenues.

long (de l'ordre du mois). Il faut dans ce cas lui permettre de reprendre sa réserve élastique.

Quant aux joints métalliques, seuls quelques rares types peuvent être réutilisés, une dizaine de fois, tout au plus.

Lorsqu'un joint statique fuit immédiatement à la mise en service, les causes principales doivent donc être recherchées le plus souvent en examinant si le montage a été correct, si les surfaces à assembler sont propres, assez finement usinées et sans rayure radiale ou trace de coups. Enfin, on doit vérifier si le serrage est suffisant et bien réparti. Tout cela constitue 90 % des causes d'échecs d'étanchéité statique.

5.2.2.6.2 Fuite en cours de fonctionnement

On suppose d'abord, évidemment, que les causes précédentes n'existent pas puisque le joint a une étanchéité correcte à la mise en service.

Dans ce cas, on retrouve les causes suivantes.

– **mauvais choix du joint** : les causes précédentes (§ 5.2.2.6.1), agressions chimiques, action de la température, résultent d'un mauvais choix du matériau du joint ou d'une durée de vie trop grande.

Une autre cause très importante de fuite est liée au phénomène de fluage du matériau du joint. Les métaux mous y sont particulièrement sensibles. La pression d'application du joint sur les surfaces à étancher diminue lentement dans le temps et, à partir d'une certaine valeur, une fuite apparaît ;

– **liaison mal conçue** : il s'agit ici essentiellement de la rigidité des surfaces à étancher et de celle des organes de fixation, souvent le boulonnage. Les diverses sollicitations, variables dans le temps, risquent d'entraîner des déformations plastiques, d'où une pression de serrage insuffisante et irrégulière sur le joint (réserve élastique trop faible du joint). Les variations importantes de pression, mais surtout de température, sont une des sources principales de défauts

d'étanchéité dans le temps. Les défauts peuvent aussi avoir pour origine une trop grande différence dans les coefficients de dilatation entre le joint et les matériaux de la jonction ;

— **réutilisation des joints** : sauf avec les élastomères, c'est aussi une cause non négligeable de fuite en cours de service ; le joint a été fatigué, ou les surfaces d'appui ont été marquées par le montage précédent. Il est quelquefois nécessaire, pour assurer une étanchéité à la remise en route correcte, d'opérer un serrage plus important, d'où un risque de fluage du joint ou de déformation prohibitive de la jonction.

Dans le cas de fuites en service, les causes doivent être recherchées principalement dans un joint mal adapté qui va fluer, ou dans un serrage trop important, en tous cas incompatible avec la résistance de la liaison.

Les sollicitations en pression et surtout en température sont, de loin, les causes principales de fuite en service.

5.2.2.6.3 Conclusion

En résumé, un joint d'étanchéité statique ne peut donner satisfaction que si, non seulement il a été bien choisi en fonction du fluide à étancher, de sa température et de sa pression, mais aussi si son appui est correct, son montage bien fait, les surfaces à assembler lisses et propres et le serrage convenable. Il est le plus souvent important de serrer les vis et les boulons à l'aide de clés dynamométriques ou même mieux, si ces pièces sont de gros diamètre, par traction contrôlée et d'une manière progressive et symétrique.

5.2.2.7 Produits d'étanchéité

Il existe des produits qui, tout en n'étant pas des joints, permettent de rendre étanche l'assemblage de deux surfaces sans d'ailleurs qu'elles aient de très bonne qualité de rugosité.

Ces produits se présentent sous forme d'une pâte, plus ou moins visqueuse, que l'on étale sur l'une, voire les deux surfaces à réunir et qui va adhérer fortement aux surfaces et durcir après assemblage. Cette pâte comble les rugosités et élimine les chemins de fuite.

Il existe de nombreux produits d'étanchéité, qui peuvent se diviser en deux grandes familles :

- ceux à un seul composant, tels que les résines anaérobies, par exemple la *Loctite*, qui se polymérisent à l'abri de l'air, ou d'autres résines dont le durcissement a lieu par chauffage ou par action de l'humidité ; les premières sont actuellement très utilisées ;
- ceux à deux composants, dont l'un assure la polymérisation, tels que les résines *Epikote (Araldite)*, et les produits silicones ; ces derniers assurent une liaison souple mais peu résistante à la pression (inférieure à 1 MPa).

Les produits d'étanchéité, simples d'emploi, nécessitent toujours, pour être efficaces, un nettoyage et surtout un dégraissage parfaits des surfaces. Ils donnent des liaisons indémontables (sauf par la chaleur ou par certains solvants). L'étanchéité obtenue est très bonne, mais il ne faut pas des sollicitations mécaniques trop violentes sur la liaison et les températures de service doivent rester assez faibles (environ 80 °C au maximum).

Leur utilisation est assez fréquente dans l'assemblage d'organes étanches à partir d'éléments qui ne seront plus démontés.

5.2.2.8 Étanchéité aux liaisons filetées et tubes

Les assemblages par filetage ne sont, en pratique, pas étanches avec les liquides, sauf le filetage NPT (National Pipe Taper) dit aussi Briggs.

Pour assurer une étanchéité, plusieurs solutions existent :

- utilisation d'un joint, en particulier de rondelles spéciales avec un revêtement interne en élastomère [bague BS (Bonded Scal), figure 35] ; il faut remarquer qu'il est toujours déconseillé de venir

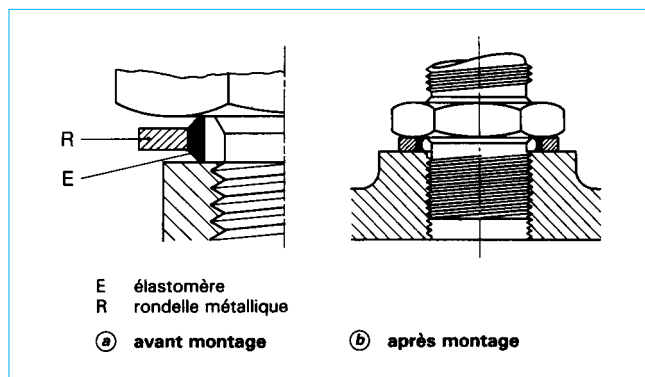


Figure 35 - Bague d'étanchéité type BS

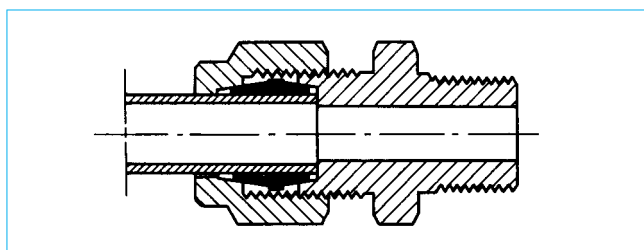


Figure 36 - Raccord de tube double-cône

plaquer la surface à étancher sur un joint par rotation car il risque d'être détérioré et l'étanchéité en est souvent affectée ;

- utilisation d'un produit d'étanchéité donné au paragraphe 5.2.2.7 ;
- utilisation d'un ruban d'étanchéité en PTFE, de faible épaisseur (0,1 mm environ), que l'on vient enrouler autour de la partie mâle du filetage (généralement en 2 ou 3 couches) ; l'étanchéité est bonne et le démontage très facile ; de plus, par suite des caractéristiques du PTFE, la température peut atteindre 250 °C et il n'y a aucune agressivité, quel que soit le fluide.

Pour raccorder des tubes en étanchéité, il existe de nombreux types de raccords qui donnent en général satisfaction. Le plus répandu utilise une bague biconique en métal plus dur que celui des tubes (figure 36) qui vient se serrer dans chacune des extrémités des tubes. Toutefois, pour des étanchéités très grandes avec les gaz, ces dispositifs ne doivent être utilisés que pour de petits diamètres (jusqu'à 20 mm environ). Au-delà, l'utilisation de joints est recommandée.

5.2.2.9 Traversées électriques étanches

La traversée en étanchéité à travers une paroi de conducteurs électriques pose des problèmes particuliers, surtout si cette étanchéité doit être excellente, ce qui est souvent le cas. La principale difficulté est celle de l'isolation électrique, les conducteurs pouvant être sous des tensions élevées.

Le plus souvent, des traversées spéciales couramment commercialisées se composent d'un isolant en verre fritté, ou en céramique, serti dans un corps métallique, les conducteurs traversant cet isolant. Le corps métallique est soudé, ou brasé, sur la paroi à traverser (figure 37).

De telles traversées électriques résistent à des pressions élevées qui, pour des diamètres de 20 ou 30 mm, atteignent 50 MPa. Leur tenue en température, jusqu'à 200 °C, est bonne, à condition toutefois de limiter les chocs thermiques. C'est en effet le point

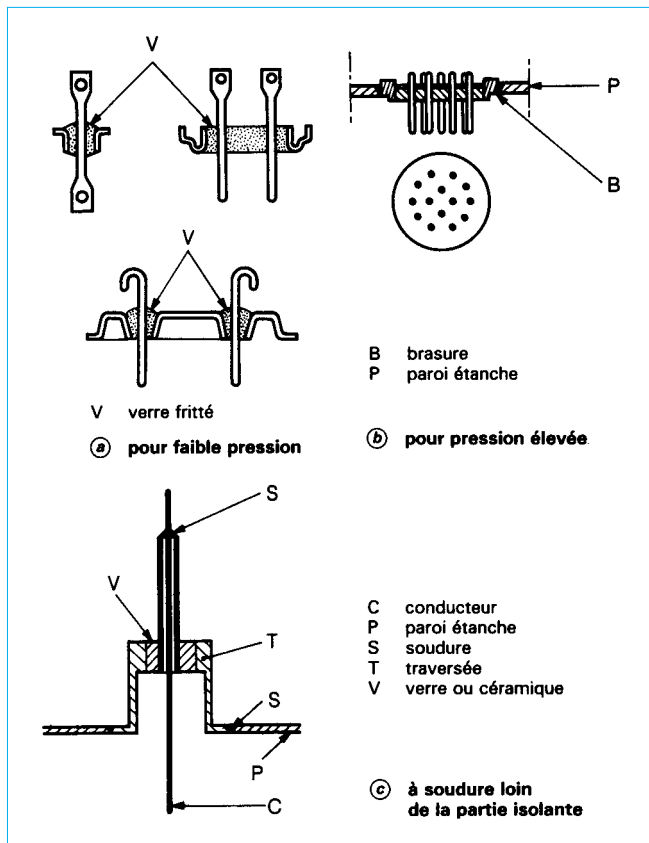


Figure 37 – Traversées électriques étanches

délicat ; de même, au montage, il faut éviter tout échauffement brusque de l'isolant, ce qui est fait par exemple dans la traversée de la figure 37c, par l'éloignement de la soudure de la partie isolante frittée.

6. Étanchéité aux liaisons dynamiques en translation

L'étanchéité des surfaces en mouvement relatif doit, le plus généralement, être obtenue aussi bien à l'arrêt que quelle que soit la vitesse de déplacement de ces surfaces, en n'étant la source que d'efforts les plus réduits possible.

6.1 Étanchéité rigoureuse

6.1.1 Par déformation

Un organe souple, métallique, facilement déformable est soudé, ou brasé, sur chacune des surfaces mobile et fixe. Il s'ensuit un effort de déplacement qui est généralement proportionnel à la course.

Une première solution consiste à utiliser une **membrane** de faible épaisseur, de quelques centièmes à un ou deux dixièmes de millimètre, généralement ondulée pour lui donner une plus grande

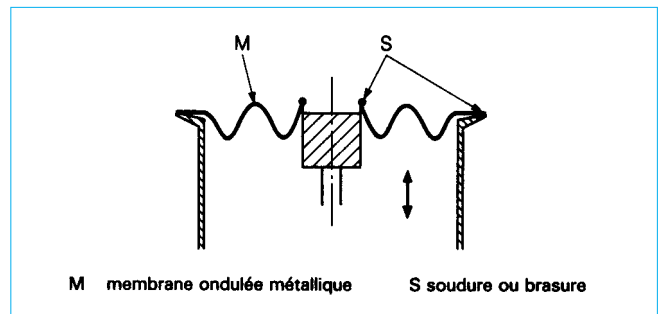


Figure 38 – Étanchéité par membrane métallique déformable

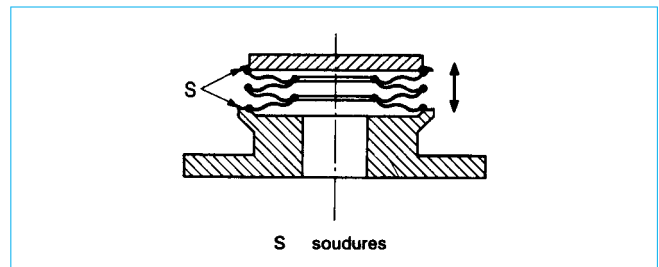


Figure 39 – Étanchéité par soufflet à disques soudés

flexibilité (figure 38). La course est très réduite, de l'ordre du millimètre, ainsi que les pressions possibles, de l'ordre de quelques fractions de mégapascal. Une membrane seule est assez rarement utilisée.

La seconde solution met en œuvre les soufflets métalliques dont il existe deux types.

- **Soufflets à disques soudés** (figure 39) : par empilement des membranes précédentes (figure 38), les courses s'ajoutent. Il est alors possible d'avoir des déplacements de plusieurs millimètres, voire plusieurs centimètres. Les pressions d'utilisation restent faibles, du même ordre que les précédentes. Le coût est élevé. On les utilise principalement dans le vide et dans certains appareils de mesure.

- **Soufflets onduleux** : ils acceptent des pressions beaucoup plus élevées (jusqu'à 10 MPa pour les petits diamètres pouvant atteindre 10 mm environ). Leur raideur est nettement plus élevée que les précédents ainsi que leur encombrement (rapport course sur longueur initiale de l'ordre de 0,2 contre 1, voire 4 pour les disques soudés). Leur utilisation est très courante dans de nombreux appareils de mesure ou de régulation, sur des robinets (figure 40), des tuyauteries, etc.

6.1.2 Par l'intermédiaire d'un champ magnétique

Si l'une des pièces est magnétique et si l'autre est munie d'un aimant ou d'un électroaimant, le déplacement de l'une provoquera le déplacement de l'autre, une cloison amagnétique, qui assure l'étanchéité, étant placée entre les deux. Il faut remarquer que l'entraînement ne possède pas une très grande rigidité mais que l'effort de déplacement dû au dispositif d'étanchéité lui-même est nul ; de plus, la course peut être très importante et la pression élevée. Ce type d'étanchéité est relativement peu utilisé, sauf pour l'entraînement d'index indicateurs ou dans certains convoyeurs (industrie nucléaire).

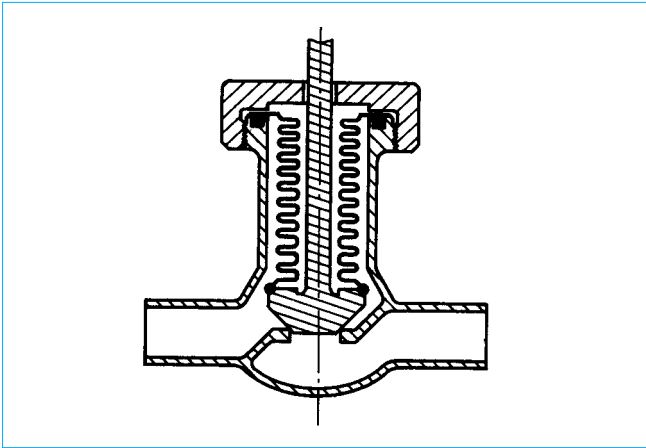


Figure 40 – Étanchéité de robinet par soufflet ondulé

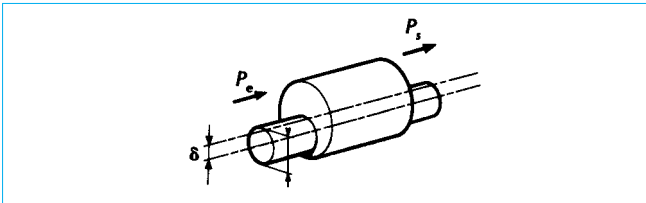


Figure 41 – Écoulement à travers une section annulaire

6.2 Étanchéité par fuite contrôlée

6.2.1 Jeu annulaire lisse

Pour qu'un organe qui traverse une paroi soit mobile, il est nécessaire qu'existe entre eux un jeu. Ce jeu va entraîner une fuite qui sera d'autant plus importante qu'il aura une valeur plus grande. Néanmoins, avec certains liquides, surtout si la viscosité est assez élevée, la fuite sera faible et tout à fait acceptable si le liquide reste à l'intérieur du système, comme dans un tiroir de distributeur hydraulique par exemple. Aussi, ce type d'étanchéité, très simple, est courant en hydraulique de transmissions.

L'écoulement à travers une fuite annulaire d'un liquide en régime laminaire donne un débit volumique de fuite égal à :

$$Q_v = \frac{\pi D (P_e - P_s) j^3}{12 \eta L} \left(1 + \frac{3}{2} \varepsilon^2\right)$$

avec ε excentricité relative de l'arbre dans l'alésage ($= 4 \delta / j$),

δ distance entre l'axe de l'arbre et celui de l'alésage (figure 41).

La figure 42 donne un abaque complet, valable aussi bien pour les gaz que les liquides, en régimes laminaire et turbulent.

6.2.2 Dispositif à gorges et rainures

Pour diminuer les fuites, il est possible de réaliser sur l'arbre, ou dans l'alésage, ou bien encore sur les deux à la fois, de petites gorges qui vont perturber l'écoulement en entraînant une perte de charge supplémentaire donc une diminution du débit de fuite (figures 43 et 44). Cette solution est très utilisée en hydraulique.

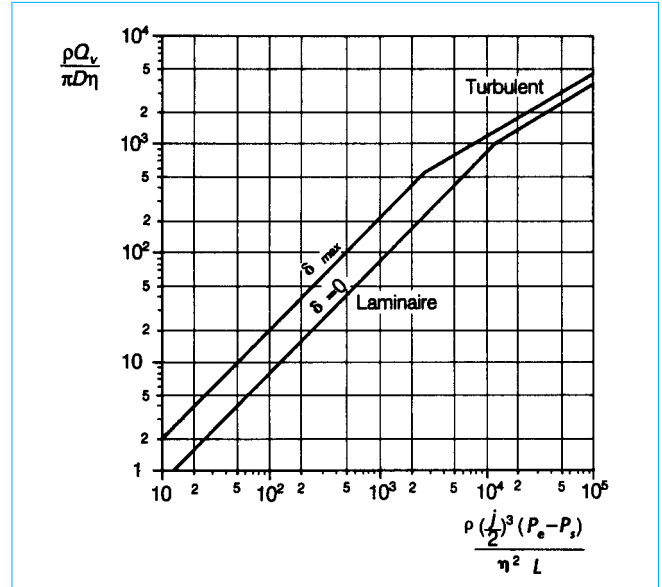


Figure 42 – Courbe de débit volumétrique dans un espace annulaire

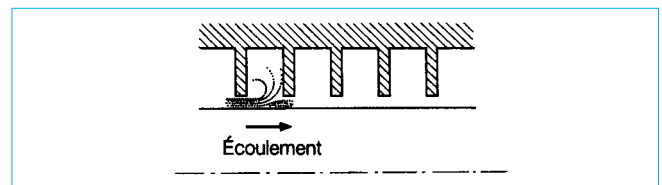


Figure 43 – Phénomène de perturbation dans un écoulement à section à gorges

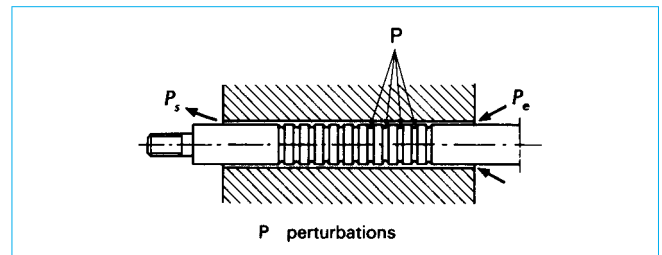


Figure 44 – Étanchéité à fuite contrôlée à gorges

La perte de charge donnée par une série de gorges réalisées dans l'alésage, ou sur l'arbre, a sensiblement pour valeur [15] (figures 45 et 46) :

$$P_e - P_s = \rho \frac{v_e^2}{2} [1,5 + z(a + 0,5b + \xi_f)]$$

avec ρ masse volumique,

v_e vitesse d'écoulement du fluide,

a et b donnés par la figure 46a en fonction du rapport de S_j et S_g , respectivement section du jeu inter-gorges et section de la gorge,

$$\xi_f = \lambda \ell / D_H,$$

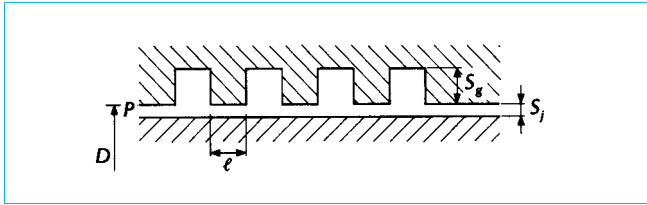


Figure 45 - Perte de charge à travers des gorges

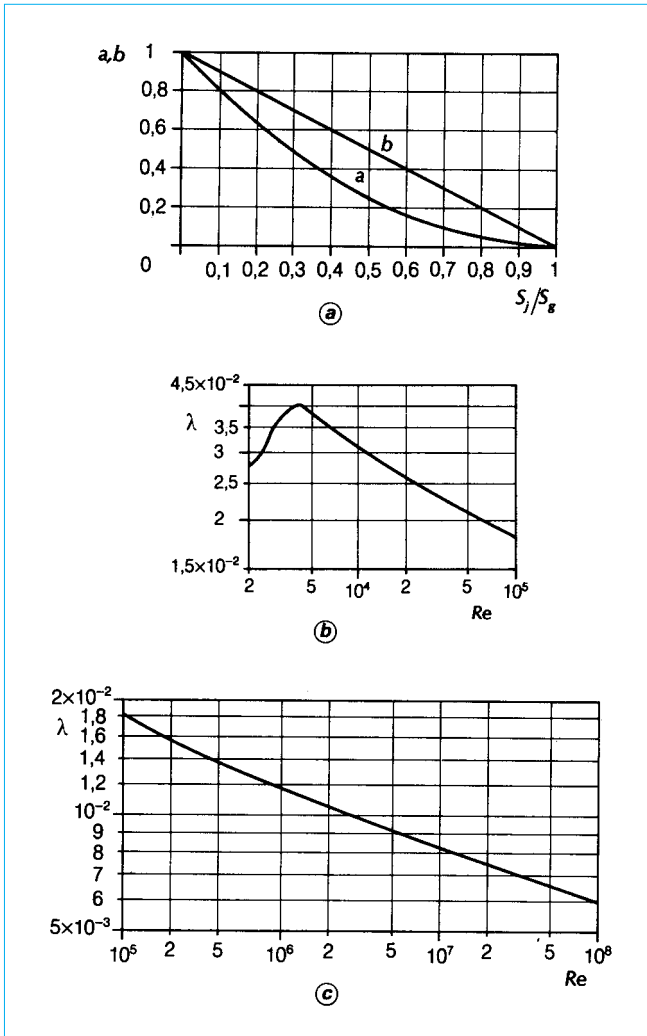


Figure 46 - Abaques pour la détermination des coefficients a, b et λ servant au calcul des pertes de charge

- λ donné par les courbes de la figure 46b et c en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement,
- l longueur de chacun des jeux inter-gorges,
- D_H diamètre hydraulique $\left(= \frac{4 S_1}{\pi D} \right)$,
- z nombre de gorges.

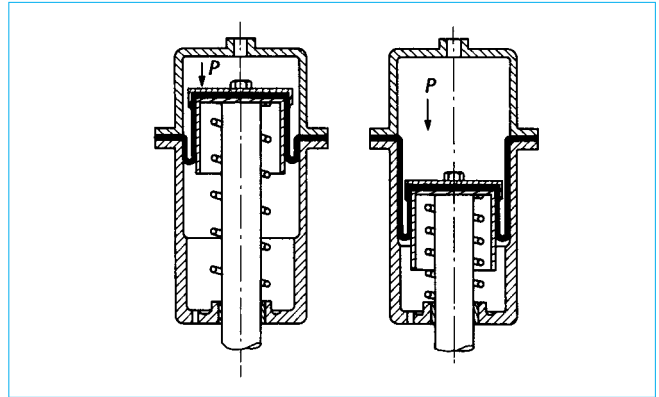


Figure 47 - Membrane à déroulement

6.3 Étanchéité relative

6.3.1 Par déformation

Comme en étanchéité absolue, des membranes déformables sont utilisées mais elles sont réalisées à partir d'élastomères. Comme ces matériaux ne sont pas totalement imperméables, une très petite fuite existe, surtout avec les gaz.

La membrane peut être sensiblement plane, serrée sur chacun de ses bords. La course reste limitée à quelques millimètres. Pour supporter des pressions assez élevées (5 MPa voire plus), suivant le diamètre, elle est souvent toilée. Ce type est utilisé par exemple dans les manodétendeurs ou les régulateurs.

La membrane à déroulement (figure 47), d'épaisseur plus faible (quelques dixièmes de millimètre), permet des courses beaucoup plus grandes, pouvant atteindre quelques dizaines de centimètres. La pression, toutefois, est limitée et ne dépasse guère 1 MPa pour les membranes les plus petites. Un autre avantage est un déplacement avec un effort faible et constant quelle que soit la course. Il est important que la membrane soit bien guidée et appuyée sur des parties cylindriques lisses, surtout si la pression n'est pas négligeable.

Ces membranes trouvent une application principale dans des appareils de mesure ou dans des vérins à faible effort de déplacement.

6.3.2 Par joints

L'étanchéité en mouvement de translation est le plus souvent résolue avec un joint qui, solidaire d'une des deux surfaces, va venir en contact avec l'autre surface et donc frotter sur elle. L'étanchéité devant être assurée aussi à l'arrêt, ce joint, outre des caractéristiques de joint statique, doit présenter les meilleures caractéristiques en frottement possible, c'est-à-dire :

- résistance au déplacement minimale,
- usure négligeable.

Le frottement entraîne un dégagement de chaleur souvent préjudiciable à la durée de vie. Toutefois, il faut remarquer qu'en translation la surface en contact glissant avec le joint se renouvelle, ce qui facilite l'écoulement thermique.

La résistance au déplacement et à l'usure est fonction de très nombreux paramètres dont les principaux sont :

- la nature du matériau du joint,
- la nature du matériau de la surface frottante,
- la vitesse de déplacement,
- la pression,

- le fluide à étancher,
- la qualité de la surface mobile (dureté, rugosité, etc.).

Les règles de base de la réduction du frottement et de l'usure doivent être appliquées avec soin, à savoir :

a) empêcher le contact direct des deux surfaces en mouvement par l'interposition de lubrifiant, d'où la nécessité de lubrifier le joint si le liquide lui-même n'est pas un lubrifiant, un joint sec n'ayant pratiquement aucune durée de vie ;

b) faire frotter entre eux des matériaux différents par leur nature et leur dureté ;

c) rendre la surface qui parcourt le plus grand chemin la plus dure possible avec la rugosité la plus faible ; cette surface correspond à celle dont tous les points ne sont pas soumis simultanément au frottement ; en étanchéité avec joint, cette surface est le plus souvent celle de l'arbre qui doit donc avoir une grande dureté et une faible rugosité ;

d) faire les rayures d'usinage perpendiculaires au déplacement, ce qui est, de plus, favorable du point de vue de l'étanchéité ;

e) rendre le facteur thermique défini comme le produit (capacité thermique \times masse volumique \times coefficient de conductivité thermique) le plus grand possible ; il est aussi nécessaire que le corps de la surface qui parcourt le plus grand chemin, ici c'est l'arbre, ait un facteur thermique minimal, ce qui n'est pas toujours facile à respecter.

6.3.2.1 Matériaux pour joints de translation

D'assez nombreux matériaux utilisés pour les joints statiques le sont aussi pour les joints dynamiques.

6.3.2.1.1 Élastomères

Les élastomères sont beaucoup utilisés dans ce type de joints malgré un coefficient de frottement assez élevé et une mauvaise conductivité thermique. Il est absolument indispensable, avec les élastomères, de lubrifier le joint. Les familles principalement employées sont :

- les nitriles, surtout avec les huiles minérales ;
- les silicones pour des températures jusqu'à 200 °C, mais ils sont peu résistants à l'usure ;
- les produits fluorés également pour des températures jusqu'à 200 °C ; ils sont utilisables avec de nombreux produits chimiques et ont de bonnes qualités mécaniques ;
- il faut y ajouter le polyuréthane, très résistant à l'usure, mais sensible à un certain nombre de fluides liquides, en particulier l'eau.

Il est important de remarquer que la matière du joint en contact avec la surface frottante s'échauffe ; par suite, sa température risque d'être supérieure à la température du fluide. Si cette dernière est voisine de la température limite d'utilisation de l'élastomère, il y a risque de détérioration. Cela est vrai aussi pour les autres matériaux, d'autant plus que leur coefficient de conductivité thermique est faible.

6.3.2.1.2 Matières plastiques

Les polyamides sont utilisés assez souvent car ils ont un coefficient de frottement relativement faible. Ces matériaux étant aussi très mauvais conducteurs de la chaleur, ils sont souvent chargés par des poudres de graphite ou de bisulfure de molybdène (qui abaissent encore le coefficient de frottement) et par de fines particules métalliques (cuivre, plomb, etc.), mais le plus intéressant est le PTFE dont le coefficient de frottement est très bas (0,1 à 0,05).

Le PTFE permet aussi de travailler dans des fluides jusqu'à 250 °C et, chargé de graphite ou de bisulfure de molybdène, il peut fonctionner avec une lubrification très faible, voire absente, sous des conditions de pression et de vitesse toutefois modérées.

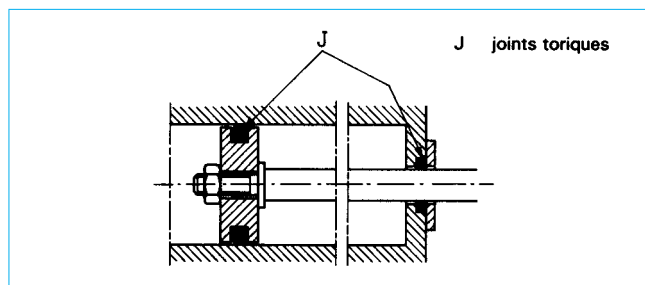


Figure 48 – Joint torique en translation

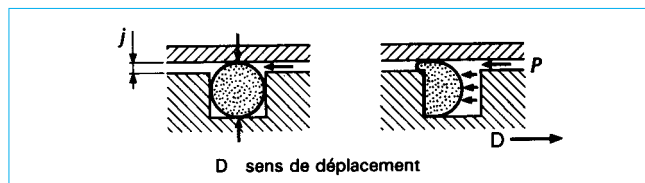


Figure 49 – Risque d'extrusion en déplacement

6.3.2.1.3 Métaux

Sauf pour les segments, ils sont peu utilisés, par suite de leur tendance au grippage. Là aussi, la lubrification est très importante et absolument indispensable.

La fonte et le bronze sont les deux matériaux courants.

6.3.2.1.4 Autres matériaux

Le graphite est un matériau assez utilisé pour son faible coefficient de frottement, pour son bon transfert thermique et pour sa grande inertie chimique même à température élevée (400 °C dans l'air).

On utilise parfois l'amiante en association avec le PTFE.

6.3.2.2 Formes des joints en translation

6.3.2.2.1 Joints toriques

● **À section circulaire** : le joint torique à section circulaire en élastomère est assez utilisé en étanchéité de translation. Il peut être monté soit dans l'alésage, soit sur le piston (figure 48). Cependant, du fait de sa forme, il a tendance à rouler lors du mouvement et s'il est soumis à une pression assez importante, une détérioration risque de se produire (figure 49).

Le jeu maximal possible entre piston et alésage dépend de la pression du fluide et de la dureté de l'élastomère. Il est donné par la figure 50.

La vitesse de déplacement doit être faible (en général jusqu'à $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), parfois il est possible d'atteindre $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Le frottement est relativement important. Un ordre de grandeur peut être calculé à partir de l'expression suivante :

$$F_f = \alpha \pi D + \beta (S_g + S_j)$$

avec F_f (N) représentant la force de déplacement,
 α, β coefficients donnés par la figure 51, cela s'entend avec un joint lubrifié et sur une surface d'acier dur.

Au démarrage, l'effort peut être de 2 à 5 fois plus important, surtout si le joint est resté longtemps immobile.

Il est déconseillé de faire frotter des joints en élastomère sur un alliage de cuivre et sur un alliage d'aluminium. Avec ces derniers, une anodisation dure est conseillée.

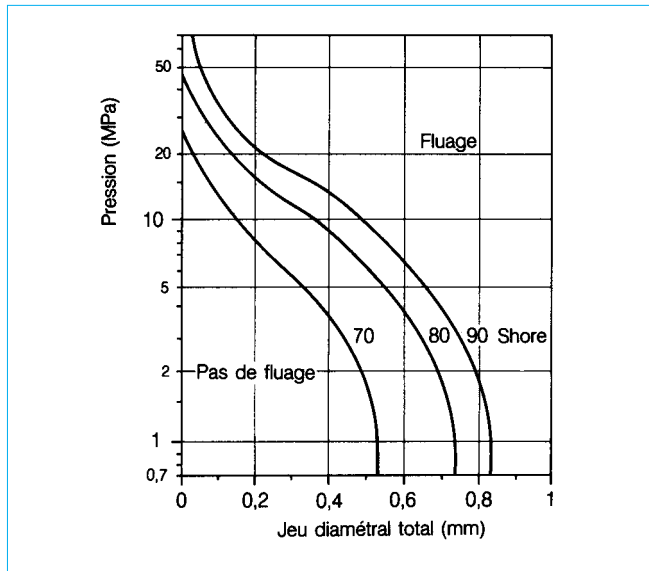


Figure 50 – Jeu maximal de l'alésage du piston pour éviter l'extrusion du joint

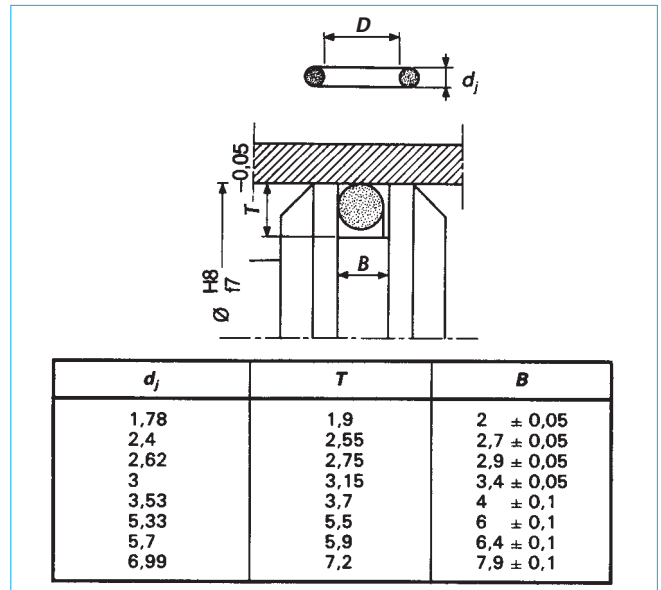


Figure 52 – Montage d'un joint torique flottant

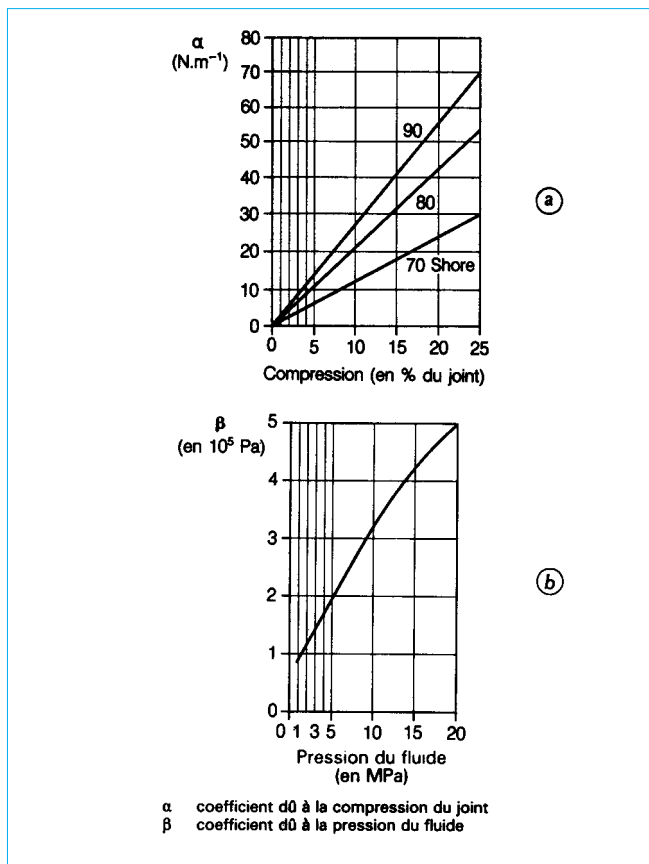


Figure 51 – Abaques pour le calcul du frottement d'un joint torique en élastomère butadiène-acrylonitrile de diamètre compris entre 4 et 6 mm

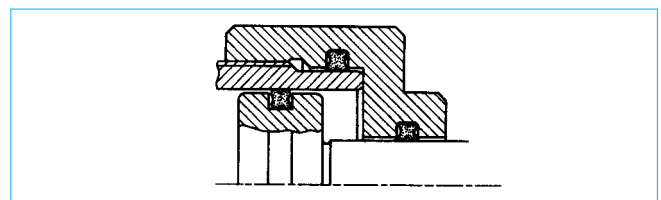


Figure 53 – Joint quadrilobe

Avec des gaz il est intéressant, pour réduire le frottement, d'utiliser le montage dit à joint flottant (figure 52) ; la pression doit être inférieure à 1 MPa. Toutefois, à la mise sous pression, un faible volume s'échappe mais la vitesse peut atteindre $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Le diamètre extérieur du joint doit être de 2 à 8 % plus grand que l'alésage du cylindre. Le diamètre intérieur du joint ne doit pas porter sur le fond de gorge. Le montage est donné par la figure 52.

- À section elliptique pour réduire la tendance au roulement : ce joint est très peu développé et ne présente qu'un faible intérêt.

- À section quadrilobe (figure 53), toujours pour réduire la tendance au roulement et réduire l'effort de frottement : l'expérience prouve toutefois que ce joint est délicat d'emploi et conduit souvent à une usure plus importante qu'avec le joint à section circulaire.

Les joints toriques en élastomère ne peuvent pas être utilisés seuls en translation pour des pressions supérieures à 10 MPa. Pour éviter le phénomène d'extrusion, on ajoute des bagues de part et d'autre du joint ; ce sont des rondelles en matières plastiques coulissant juste sur la surface en mouvement (figure 54). Ces rondelles peuvent être continues (montage en gorge ouverte) ou fendues pour permettre leur montage en gorge fermée. Il est alors possible de faire fonctionner le joint jusqu'à des pressions de 60 MPa, voire de 100 MPa.

6.3.2.2.2 Joints composites

Il existe une assez grande variété de joints composites. Le plus courant est composé d'une bague en matériau plastique, polyamide

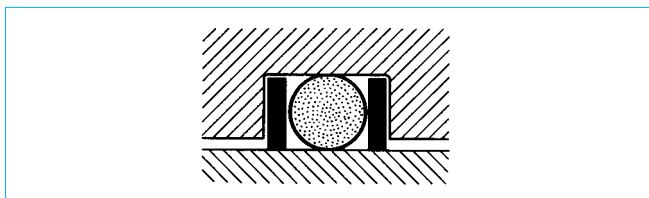


Figure 54 – Joint torique et bague anti-extrusion

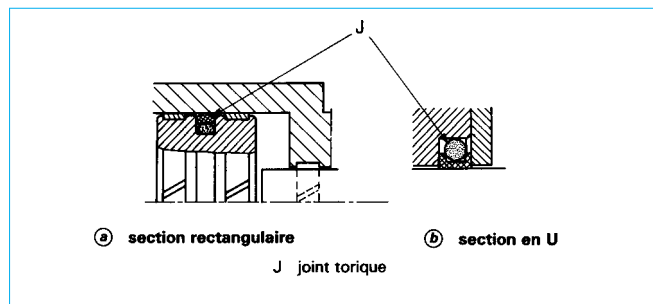


Figure 55 – Joint composite : bague + joint torique

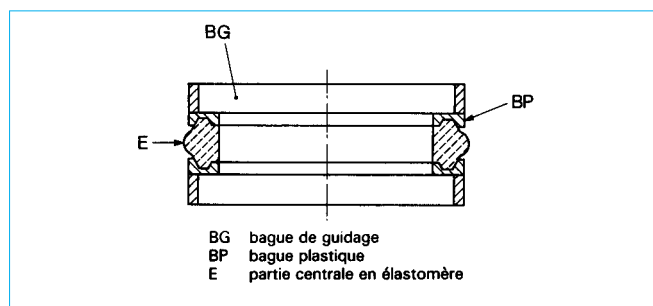


Figure 56 – Joint composite à profil spécial

ou PTFE souvent chargé, à section rectangulaire ou en U mince, qui frotte sur la partie mobile ; la bague est appuyée sur cette surface frottante par un joint torique en élastomère (figure 55).

La force de déplacement est relativement faible, nettement inférieure à celle du joint torique (§ 6.3.2.2.1). La vitesse peut atteindre $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et la pression 20 à 40 MPa. Ce joint nécessite en outre un très bon état de surface ($R_a < 0,2 \mu\text{m}$) et un centrage très précis. Il est surtout utilisé sur des appareils de très bonne qualité.

Une autre forme, actuellement assez courante sur les vérins, est celle donnée en figure 56 ; la partie centrale assurant l'étanchéité est en élastomère et elle est entourée de bagues plastiques de forme concave vers cette partie centrale.

6.3.2.2.3 Joints en U, L, V

Les premiers joints ont une section en U, le matériau étant de l'élastomère qui peut être complété à l'intérieur par un toilage de renfort pour les pressions supérieures à 10 MPa (figure 57).

L'étanchéité est réalisée par les deux lèvres du U, du côté statique comme du côté dynamique. Ce type de joint est autoétanche, mais la pression ne peut être appliquée que d'un côté, aussi, lorsque cette dernière s'inverse, il est nécessaire de prévoir deux joints tête-bêche (figure 58).

Il est aussi très important de prévoir une pièce de maintien du joint qui appuie en son centre car le déplacement de la partie

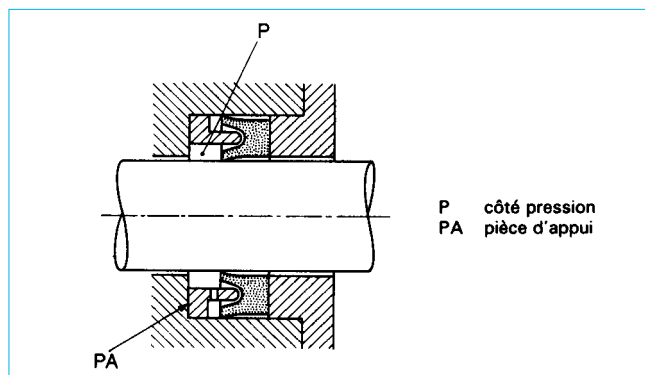


Figure 57 – Joint en U

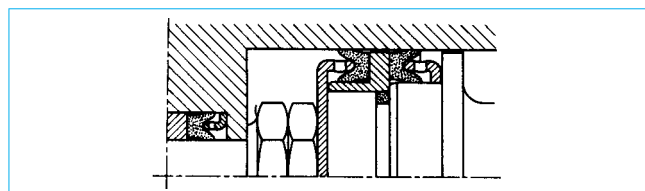


Figure 58 – Joint en U pour pression de part et d'autre du piston

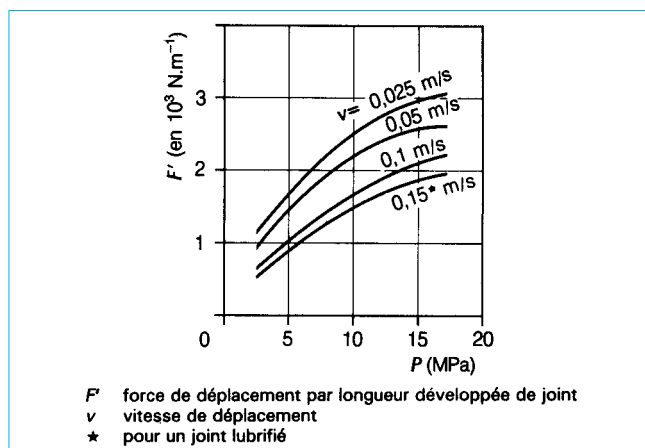


Figure 59 – Force de déplacement d'un joint en U

mobile tend à l'entraîner à l'intérieur de son logement et à détériorer la partie assurant l'étanchéité.

Le frottement de ces joints est relativement peu élevé ; la figure 59 donne un ordre de grandeur de l'effort de frottement. Avec les gaz, si la pression est faible (jusqu'à 0,7 MPa environ), il est possible d'utiliser un joint plus simple à une lèvre très souple (joint L, figure 60) ; le frottement est alors diminué d'environ 50 %. Les joints à profil en V ou joints chevron (figure 61), relativement voisins des précédents, peuvent être montés en série, ce qui autorise des pressions plus importantes (jusqu'à 40 et même 60 MPa).

Enfin, il faut mentionner un joint spécial, dont la fonction n'est pas l'étanchéité mais y est rattachée : c'est le joint racleur. Dans de nombreuses utilisations, l'atmosphère extérieure est chargée de poussières ou de particules abrasives. Il est nécessaire de protéger le joint d'étanchéité de ces grains abrasifs qui risquent d'être introduits par les mouvements de la tige. Un tel joint est donc placé

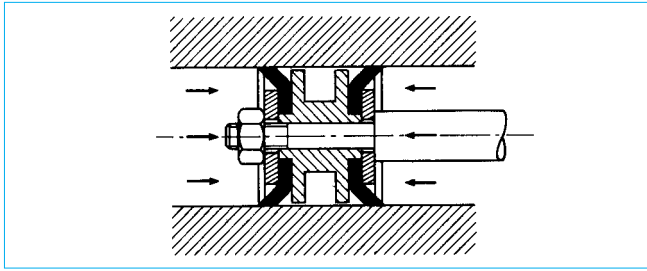


Figure 60 – Joint en L pour gaz à faible pression

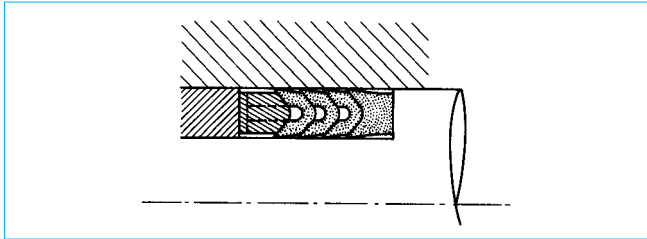


Figure 61 – Joint en V ou chevron

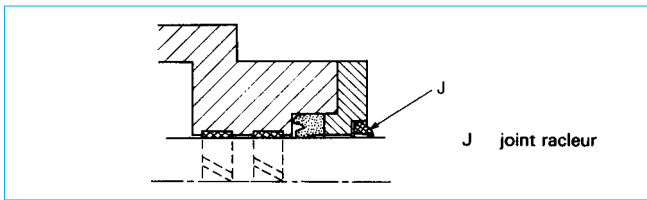


Figure 62 – Joint racleur



Figure 63 – Tresse unitaire

avant le joint principal (figure 62), il a la forme d'un racloir et il est réalisé en élastomère dur (98 Shore A) ou en matière plastique.

6.3.2.2.4 Tresses

Elles se présentent sous la forme d'un anneau de section carrée réalisé à partir d'un cordon en fils tressés coupé en biseau (figure 63). Les fils sont le plus souvent un mélange d'amiante et de PTFE. Il en existe aussi en chanvre enduit de produits gras, voire avec interposition de fils métalliques.

Ces anneaux sont placés dans des logements annulaires et serrés par un fouloir (figure 64). Leur nombre est fonction de la pression à étancher. La répartition de la pression des anneaux sur la tige coulissante n'est pas uniforme, si bien qu'à partir d'un certain nombre d'anneaux (5 à 6) leur efficacité est quasiment nulle [13].

On constate aussi, surtout au début de leur mise en service, un certain tassement qui introduit une fuite, qui nécessite un resserrage, aussi le poussoir est-il souvent monté à l'aide de ressorts qui assurent un effet de serrage relativement constant (figure 65).

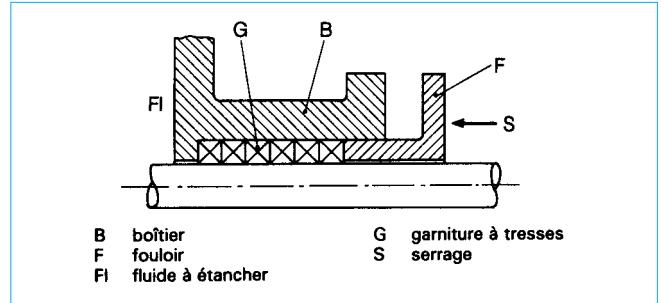


Figure 64 – Presse-garniture

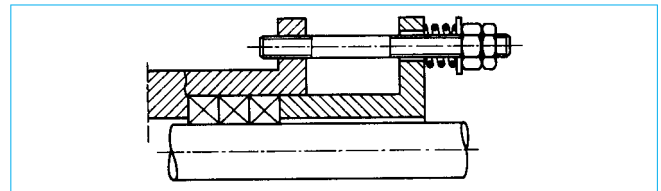


Figure 65 – Serrage automatique de presse-garniture

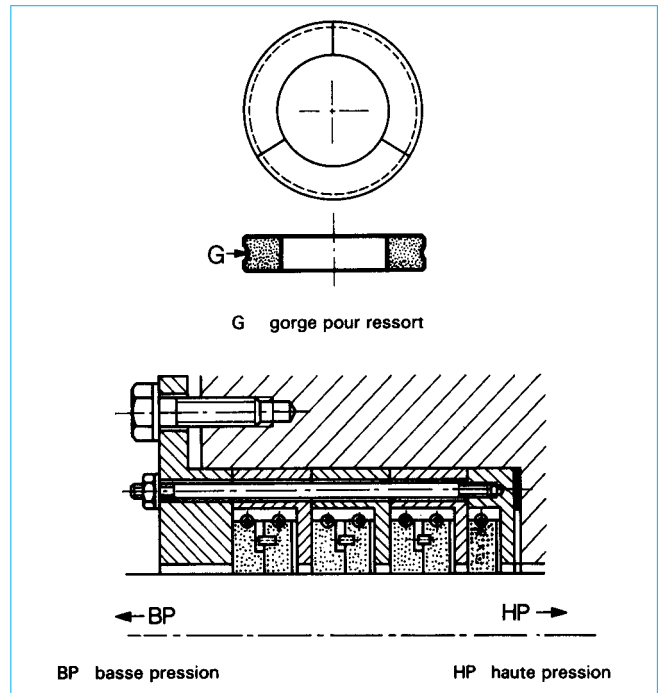


Figure 66 – Segments-anneaux de sortie de tige

Ces tresses autorisent des pressions élevées, jusqu'à 100 MPa ; les efforts de frottement sont assez importants. Elles sont beaucoup utilisées dans les pompes alternatives à haute pression.

6.3.2.2.5 Segments

Ils peuvent se présenter sous deux formes :

- des anneaux unitaires en plusieurs morceaux (en général 3) assemblés par un ressort (figure 66) et empièlés ; ils sont réalisés

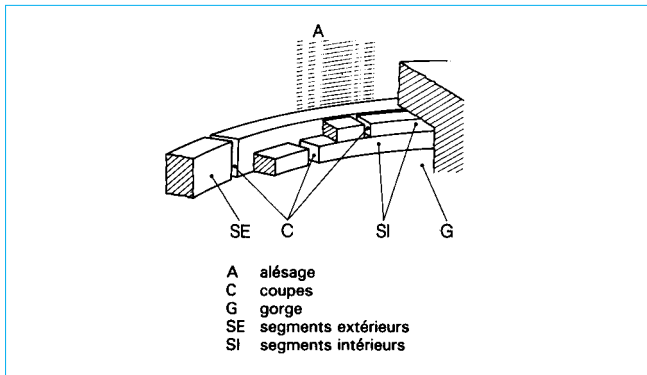


Figure 67 – Segment triple étanche

en matériaux frittés, bronze chargé de graphite ou de bisulfure de molybdène, graphite pur, etc. ; ils sont utilisés essentiellement pour les sorties de tiges avec des vitesses importantes (quelques mètres par seconde) et des pressions jusqu'à 0,25 MPa ;

– des *anneaux d'un seul morceau mais fendus*, d'un diamètre libre un peu plus grand que le diamètre à étancher et placés dans une gorge ; ils viennent frotter sur la surface en mouvement sur laquelle ils s'appliquent par élasticité ; leur section est carrée ou rectangulaire et les matériaux utilisés sont des fontes spéciales (moteur thermique, compresseur), du carbone ou du PTFE chargé (compresseur, pompe, régulateur,...) ; de par leur conception (absence de plasticité pratique, fente), ils ne présentent pas une grande étanchéité ; le plus souvent, on en monte plusieurs en série, ce qui permet de réduire les fuites.

À signaler aussi l'utilisation d'un segment triple (figure 67), qui permet de n'avoir que des fuites très faibles, les anneaux bloquant réciproquement leur fuite aux fentes.

6.3.2.2.6 Conclusion

En résumé, le tableau 6 donne les caractéristiques des joints d'étanchéité en translation les plus intéressants.

6.3.3 Précautions à prendre

Pour qu'une étanchéité en mouvement de translation avec des joints soit fiable et possède une durée de vie suffisante, il est impératif de tenir compte des règles suivantes :

Tableau 6 – Joints d'étanchéité en translation les plus intéressants

| Type de joint | Schéma | Matériau | Pression maximale MPa | Vitesse maximale $m \cdot s^{-1}$ | Frottement | Température maximale °C | Applications principales |
|---|--------|---|--------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---|
| Torique à section circulaire (§ 6.3.2.2.1) | | Élastomère | 10 | 0,2 | Assez élevé, phénomène de roulement | 200 | Mouvement d'assez faible amplitude. Pour faible encombrement, bas prix, deux sens de pression |
| Torique à section circulaire + bague (anti-extrusion) (§ 6.3.2.2.1) | | Élastomère. Matière plastique | 40 | 1 | Moyen | 200 | Vérin avec faible encombrement. Deux sens de pression |
| Composite (§ 6.3.2.2.2) | | Élastomère. Matière plastique | 40 | 2 | Assez faible | 200 | Mouvement à faible effort de déplacement. Coût important. Deux sens de pression |
| Section en U (§ 6.3.2.2.3) | | Élastomère seul ou avec armature textile | 10 | 1 | Moyen | 100 | Vérin courant de moyenne pression, huile ou autre liquide gras |
| Section en L (§ 6.3.2.2.3) | | Élastomère | 2 | 2 | Faible | 100 | Air ou gaz comprimé à assez faible pression |
| Section en V chevron (§ 6.3.2.2.3) | | Élastomère seul ou avec armature textile | 60 | 1 | Assez élevé | 100 | Vérin à forte pression à liquide |
| Anneaux Tresses (§ 6.3.2.2.4) | | Amiante. PTFE. Graphite | 100 | 5 20 | Assez élevé à assez faible | 400 650 | Sortie d'arbre de pompe alternative ou de compresseur |
| Segments (§ 6.3.2.2.5) | | Fonte ou PTFE chargé | 0,5 (par segment) | 5 | Moyen à faible | 400 | Piston de moteur ou de compresseur |
| Anneaux-segments (§ 6.3.2.2.5) | | Carbone ou bronze graphité | 0,25 (par segment) | 5 | Moyen à faible | 600 | Sortie de tige de compresseur |

- les aciers étant les matériaux les plus appropriés, la dureté de la surface frottante doit être importante, supérieure à HV 450 ;
- la rugosité doit être faible, rugosité moyenne R_a de l'ordre de $0,4 \mu\text{m}$;
- le guidage, c'est-à-dire en fait le centrage, doit être bon, un joint ne constituant jamais lui-même un centrage ;
- la lubrification doit toujours être assurée (sauf cas très particulier, faibles vitesses et pression) ;
- la température maximale du fluide doit être inférieure (de 10 à $20 \text{ }^\circ\text{C}$) à la température limite d'utilisation du matériau du joint.

6.3.4 Difficultés rencontrées

Les fuites et les usures prématurées résultent en premier lieu du non-respect des règles précédentes (§ 6.3.3).

De plus, des phénomènes propres à ce type de joints peuvent se produire, notamment avec les liquides. Il s'agit de l'effet de surpression dû à la vitesse de déplacement du joint (cf. article *Vérins hydrauliques* dans ce traité).

Il y a aussi l'effet *microdiesel* dû à un effet de cavitation, examiné dans l'article *Vérins hydrauliques*. Il est toujours important d'avoir un excellent remplissage dans les circuits hydrauliques, la présence de bulles de gaz étant très défavorable du point de vue de la tenue des joints.

7. Étanchéité aux liaisons dynamiques en rotation

7.1 Étanchéité rigoureuse

7.1.1 Par déformation

Des cinématiques permettent de transmettre un mouvement de rotation en continu en utilisant la déformation d'un organe souple, principalement un soufflet métallique, avec une étanchéité rigoureuse.

Les plus utilisées sont fondées sur la rotation d'un arbre oblique, le point milieu étant *rotulant* (figure 68a), ou d'un arbre coudé ou excentré (figure 68b).

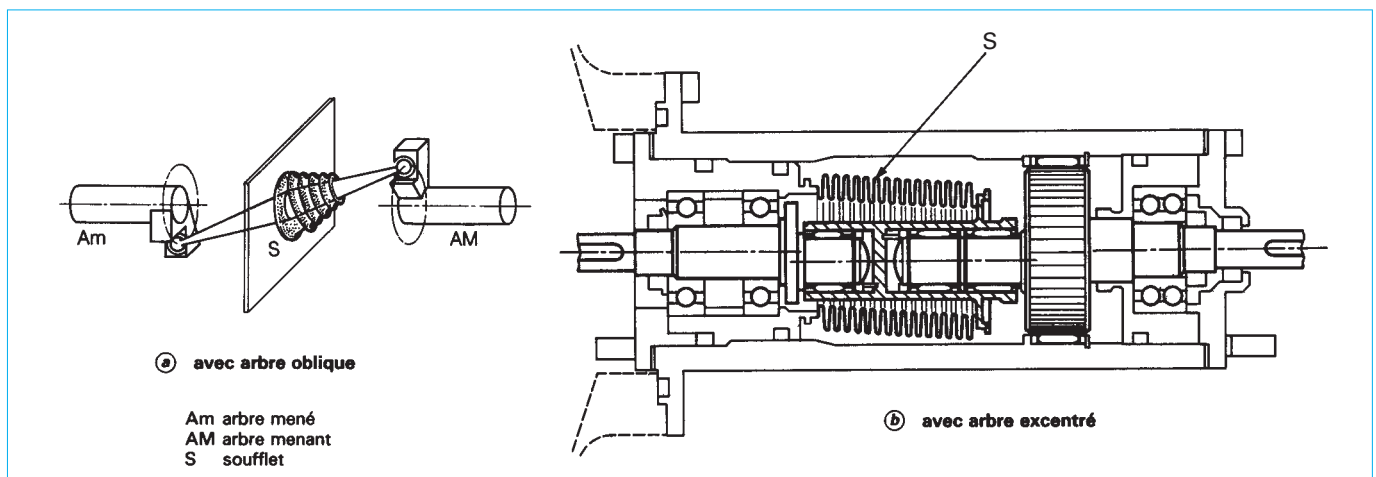


Figure 68 - Transmissions à soufflet

Ces dispositifs sont néanmoins assez compliqués et coûteux. Ils permettent des vitesses de rotation de plusieurs centaines de tours par minute et des pressions de 0 à 1 MPa environ.

Peu utilisés, ils existent dans certains appareils qui mettent en œuvre des fluides très dangereux, radioactifs, ou pour l'ultra-vide.

7.1.2 Par transmission magnétique

Une partie magnétique solidaire de l'arbre menant entraîne une autre partie magnétique solidaire de l'arbre mené, une cloison métallique à magnétique et relativement mince étant placée dans l'entrefer du champ (figure 69).

Le champ magnétique est le plus souvent produit par des aimants permanents. La cloison est cylindrique, ce qui lui permet, même avec une assez faible épaisseur, de résister à de fortes pressions (10 MPa et plus).

La vitesse peut être très élevée, mais il n'y a pas synchronisme rigoureux entre les deux arbres (il peut même se produire un décrochage).

Ce type de transmission se répand beaucoup, surtout dans les pompes pour l'industrie chimique, par suite des progrès sur les aimants qui permettent de transmettre des couples déjà importants (10 à $100 \text{ N} \cdot \text{m}$), sous des volumes assez réduits.

Un cas particulier est celui des moteurs dits à *rotor noyé* (figure 70) dans lequel le champ magnétique transmis à travers la paroi (chemise d'entrefer) est le champ tournant produit par le stator. Il est assez utilisé, par exemple, dans les accélérateurs de chauffage central.

7.2 Étanchéité par fuite contrôlée

7.2.1 Joints labyrinthes

Les étanchéités par fuite contrôlée sont du même type que celles utilisées en translation. Toutefois, puisque l'arbre ne subit pas de déplacement axial, il est possible de faire parcourir au fluide un chemin de fuite beaucoup plus grand, ce qui réduit le débit (figure 71) : ce sont les labyrinthes. Plusieurs variantes sont possibles (figure 72). Le calcul des fuites est identique à celui donné au paragraphe 6.2.2, en utilisant les paramètres de la figure 72.

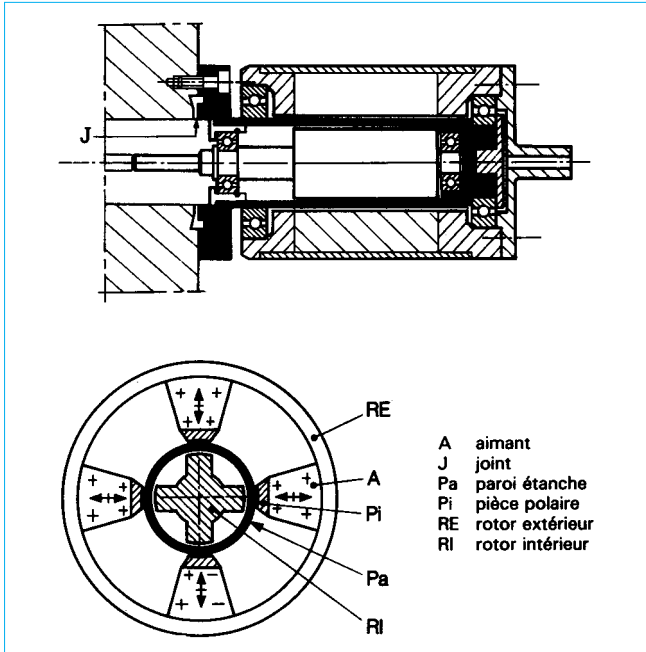


Figure 69 – Traversée magnétique étanche

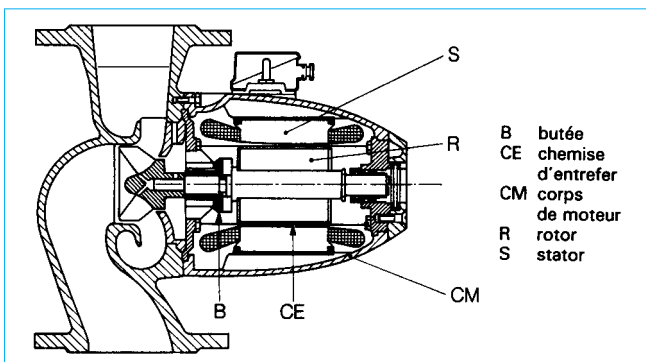


Figure 70 – Moteur d'entraînement de pompe à chemise d'entrefer

Les joints labyrinthes sont assez répandus, depuis des étanchéités aux poussières ou à l'huile sans pression (figure 73), fabriqués en série et peu coûteux, jusqu'aux dispositifs pour turbine plus ou moins complexes.

Pour réduire les fuites, il est nécessaire de diminuer le plus possible le jeu entre la partie fixe et la partie tournante.

Pour éviter des détériorations importantes en cas de contact intempestif, une partie peut être réalisée sous forme de segments mobiles (figure 74).

Avec la vapeur, le phénomène de détente assure une condensation en fin de parcours du joint, l'eau étant récupérée et renvoyée à la chaudière.

7.2.2 Joints de transferts

Pour les liquides, surtout pour l'huile, existe un autre dispositif à fuite contrôlée, dit *joint de transfert* du type hydrostatique (figure 75).

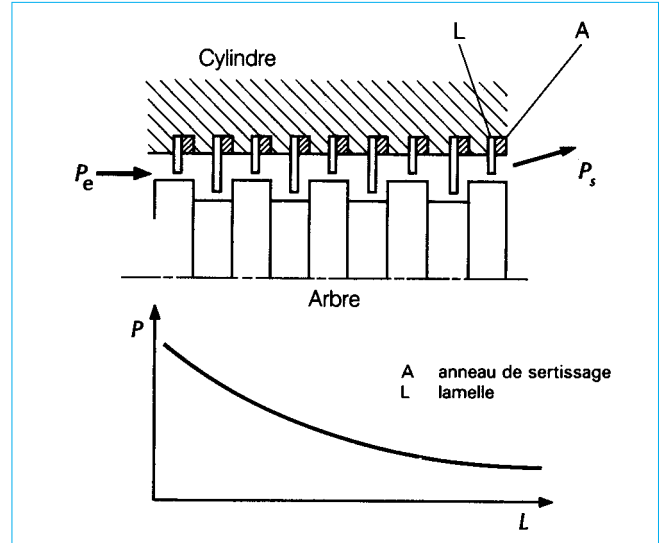


Figure 71 – Joint labyrinthe

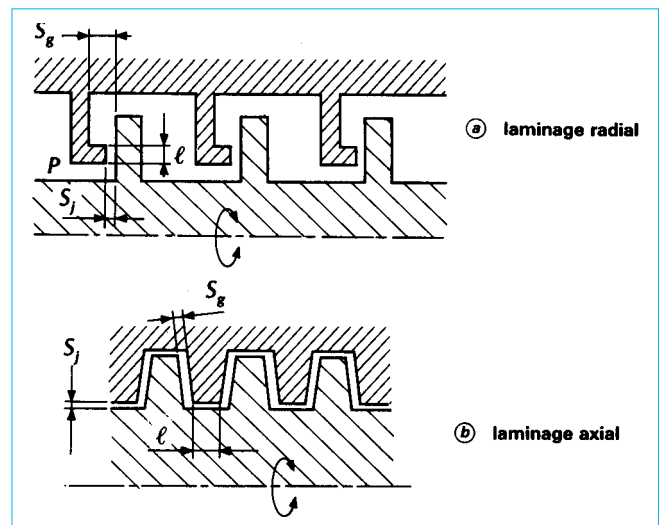


Figure 72 – Différentes formes de joints labyrinthes à laminage radial et axial

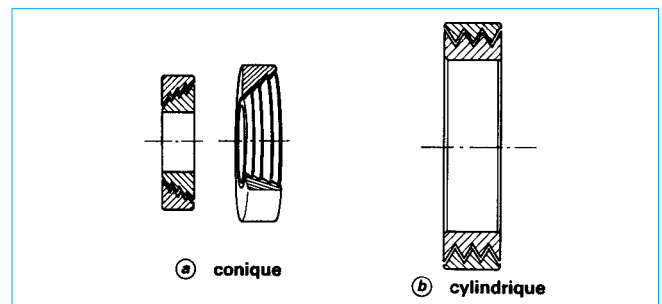


Figure 73 – Joints labyrinthes du commerce (d'après doc. FAG)

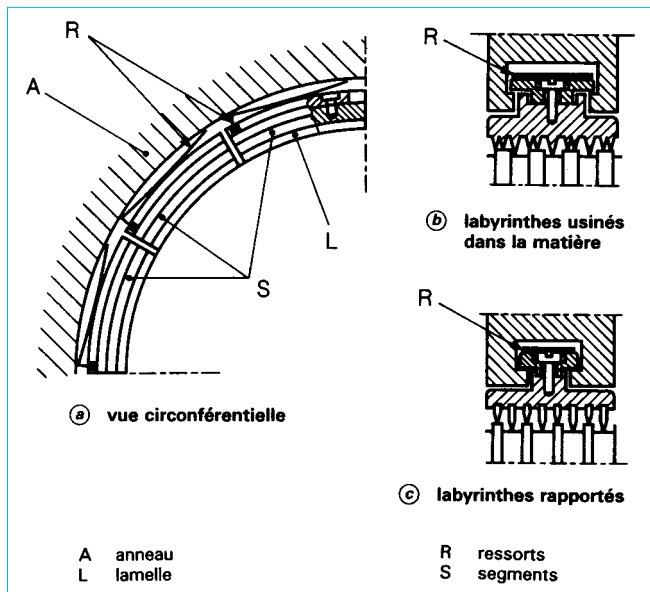


Figure 74 – Joints labyrinthes à segments éclipsables

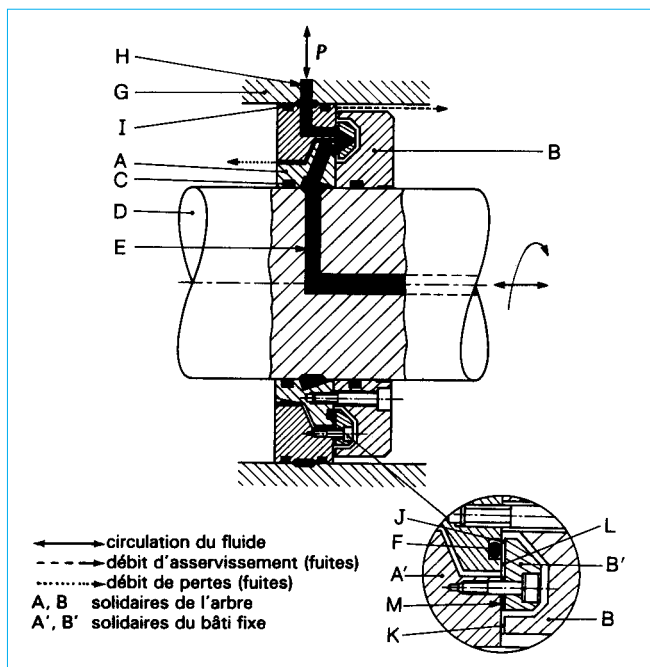


Figure 75 – Joint de transfert (d'après doc. Viscotherm)

Le joint de transfert comprend 4 pièces vissées deux à deux (A + B et A' + B'). Les pièces A/B sont reliées au moyen de joints élastiques secondaires C à l'arbre tournant ; les pièces A'/B' sont également reliées à travers des joints secondaires I avec le bâti G. Le fluide sous pression vient par un conduit H au bâti G et passe à travers les pièces A' et B' dans la rainure de distribution F qui débouche dans le plan des fentes d'étanchéité J-L. Cette rainure F est en contact au moyen de trous dans la pièce A avec les conduits E de l'arbre D. Les fentes J, K et L se trouvent dans un plan. Le jeu

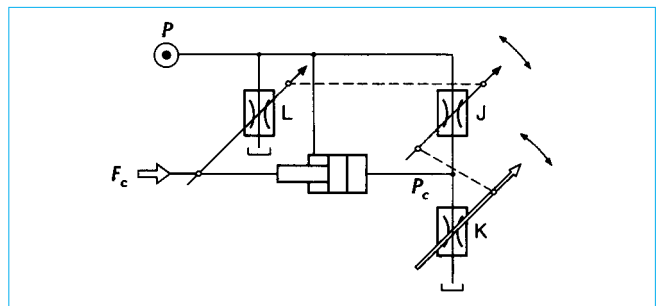


Figure 76 – Schéma hydraulique du joint de transfert

nécessaire au fonctionnement du joint est donné par l'entretoise M. Les fentes J et K, la surface de haute pression définie par la rainure de distribution F et la zone de pression intermédiaire délimitée par les fentes J et K forment le mécanisme d'asservissement hydrostatique.

L'asservissement est un demi-pont laminaire auto-ajustant à deux branches actives, les étranglements dus aux fentes J et K étant représentés par les orifices variables J et K dans le circuit équivalent de la figure 76. La fente L suit le mouvement de la fente J mais ne participe pas à l'asservissement. Le mode de fonctionnement de l'asservissement hydrostatique peut être expliqué comme suit.

a) État d'équilibre (figure 77a) : les fentes J et K forment un diviseur de pression tel que la pression intermédiaire P_c génère une force F_c antagoniste et égale à la force F due à la haute pression P dans la rainure de distribution. La résultante des forces sur la paire de pièces A/B est nulle : A/B est donc en équilibre.

b) Perturbation amenant A/B vers la droite (figure 77b) : la fente J se ferme, la fente K s'ouvre, la pression intermédiaire P_c et la force F_c chutent en conséquence. La force F restant invariable, la résultante $F - F_c$ agissant sur A/B tend à pousser la pièce vers la gauche, donc vers l'état d'équilibre selon la figure 77a.

c) Perturbation amenant A/B vers la gauche (figure 77c) : la fente J s'ouvre, la fente K se ferme. La pression intermédiaire P_c , donc la force F_c augmente et provoque une résultante $F_c - F$ qui pousse la pièce A/B vers la droite, vers l'état d'équilibre selon la figure 77a.

Les caractéristiques de ce joint sont les suivantes : les pertes de puissance dues aux fuites et au couple de frottement visqueux ne dépassent pas 3 % de la puissance transmissible (pour $P = 16$ MPa, le débit du fluide transféré étant de $3 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ au régime de $3000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$).

7.3 Étanchéité relative

Le mouvement de rotation permet de réaliser des étanchéités particulières qui ne sont efficaces que lorsqu'il y a déplacement. De tels systèmes dynamiques doivent être doublés d'un joint statique classique.

7.3.1 Par effet cinématique

7.3.1.1 Par effet visqueux

Un arbre sur lequel a été usiné un filetage et qui tourne dans le sens opposé à celui de ce filetage et dans un alésage ayant un faible jeu va exercer sur le fluide un effet de pression qui peut équilibrer la pression de ce fluide (figure 78). On réalise ainsi un joint à viscosité.

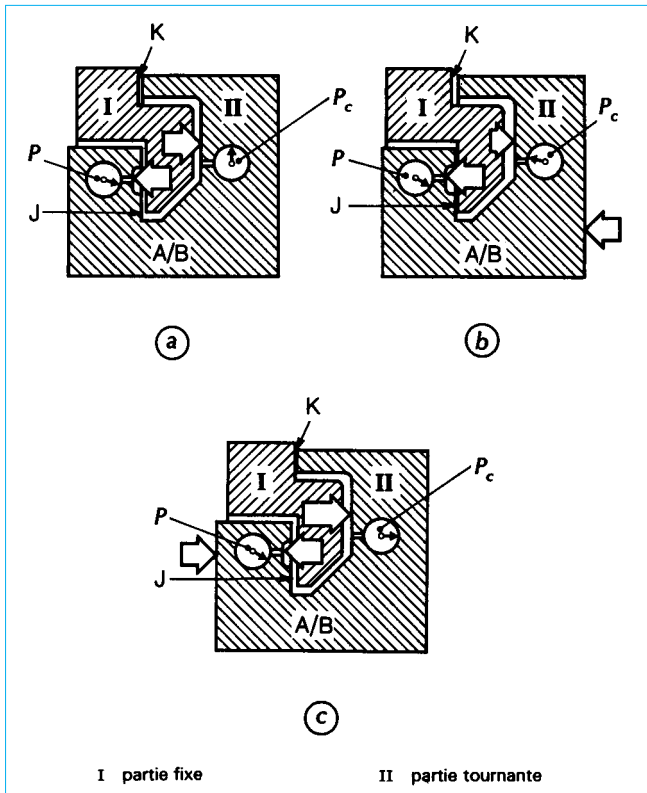


Figure 77 – Fonctionnement du joint de transfert

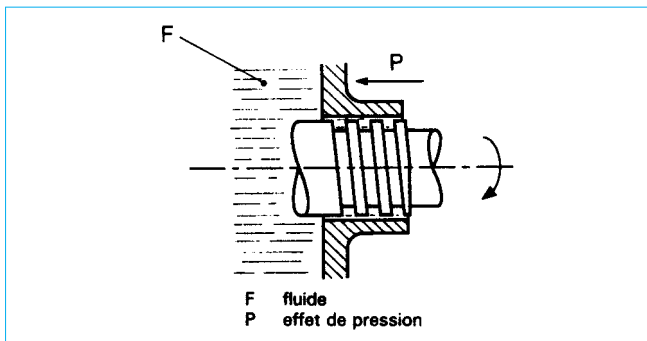


Figure 78 – Joint à viscosité

Les caractéristiques de ce système peuvent être calculées et optimisées. La pression engendrée est égale à :

$$P = \frac{12 K \eta D \omega L}{j^2}$$

avec K coefficient qui dépend du nombre de Reynolds ($K = 0,1$ pour $Re \leq 500$; K est donné par la figure 79 pour des nombres supérieurs).

La puissance W absorbée par effet de pompage est donnée par [11] :

$$W = \frac{\pi \eta \omega^2 D^3 L}{2 j} \cdot K_p$$

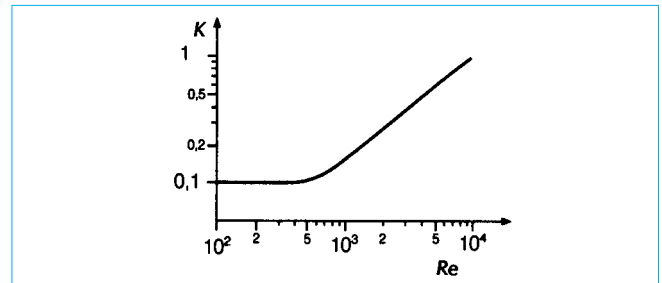
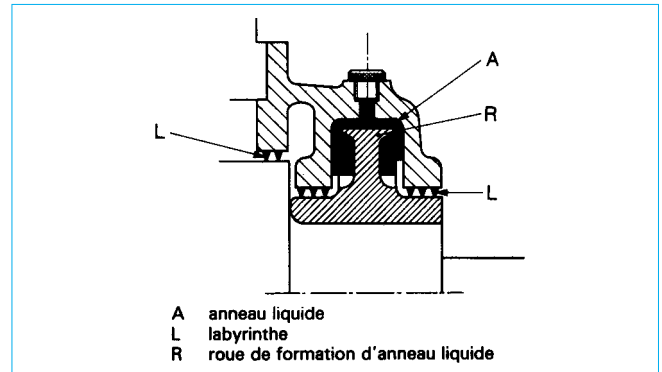
Figure 79 – Coefficient K en fonction du nombre de Reynolds

Figure 80 – Joint à anneau liquide simple centrifuge

Les pressions développées ne sont appréciables qu'avec les liquides dont, en plus, la viscosité n'est pas négligeable. Aussi, avec un arbre de 50 mm de diamètre dans un alésage de 100 mm de long, avec un jeu radial de 25 μm et avec une vitesse de rotation de 12 000 $\text{tr} \cdot \text{min}^{-1}$, la pression développée sera de 5×10^{-2} MPa avec de l'air et de 3,2 MPa avec de l'eau, en sachant que $\eta = 1,8 \times 10^{-5}$ PI pour l'air et $\eta = 1,17 \times 10^{-3}$ PI pour l'eau. Il faut noter que le filetage optimisé a les caractéristiques suivantes :

- angle de l'hélice : 15° ;
- profil rectangulaire (le plein = le creux) ;
- pas = 1 mm, multifilets ;
- rapport de la profondeur du filet au jeu radial égal à 2,7.

Le filetage peut être aussi réalisé dans l'alésage, l'arbre étant lisse.

7.3.1.2 Par effet centrifuge

Un liquide entraîné en rotation va être soumis à l'accélération centrifuge et, à l'intérieur du liquide, se développera, à une distance R_c de l'axe de rotation, une pression maximale de :

$$P_{c_{\max}} = \frac{\rho \omega^2 R_c^2}{2}$$

Un tel joint centrifuge existe en particulier pour les gaz, l'anneau liquide étant de l'eau ou un liquide lourd, du mercure en particulier (figure 80).

Un nouveau joint a été développé récemment : il utilise l'anneau liquide qui est formé par un cylindre tournant, solidaire de l'arbre, et un tube de Pitot situé à une distance R_c de l'axe, qui prélève du liquide pour la réinjecter en contre-pression au fluide à étancher (figure 81). Dans ce cas, la pression est augmentée du terme pression dynamique et, si le débit est petit, la pression maximale sera pratiquement de :

$$P_{c_{p_{\max}}} = \rho \omega^2 R_c^2$$

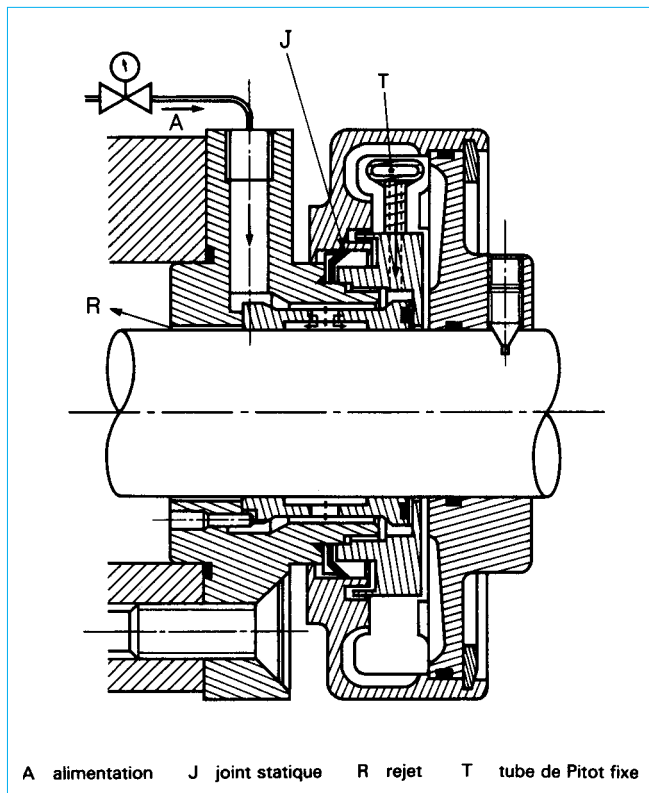


Figure 81 – Étanchéité à anneau liquide et tube de Pitot (système Legoy)

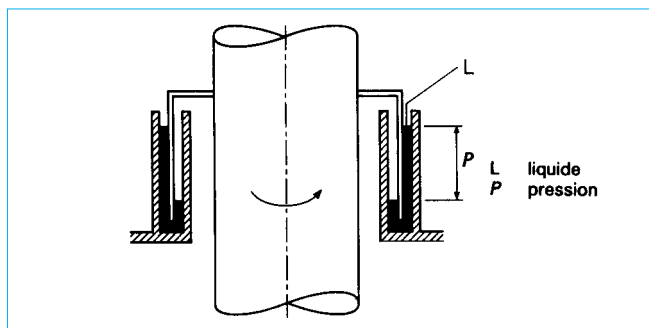


Figure 82 – Étanchéité par bain liquide

Ces types de joint nécessitent donc un joint complémentaire classique en statique et pour les faibles vitesses, mais en fonctionnement normal, ce dernier n'est plus soumis à une pression et sa durée de vie est considérablement augmentée.

7.3.1.3 Par bain liquide

L'étanchéité est excellente même à l'arrêt, exclusivement pour les gaz.

Ce système est très simple. Une gouttière contient un liquide dans lequel plonge une tôle cylindrique solidaire de l'arbre (figure 82). Si le liquide mouille très bien les parois, l'étanchéité peut être considérée comme rigoureuse si l'on fait abstraction de

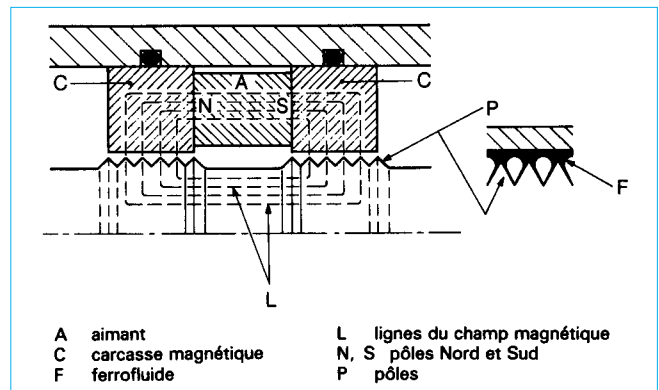


Figure 83 – Étanchéité par fluide magnétique

la pression de vapeur de ce liquide. Toutefois, le système ne fonctionne que pour un arbre d'axe vertical et avec une pression et une vitesse de rotation faibles. Même avec des liquides de forte masse volumique, le plus adapté étant le mercure, la pression possible ne dépasse guère 0,05 MPa.

À noter que ce liquide peut être solidifié (ou l'inverse, s'il s'agit d'un solide à température ambiante, on peut le rendre liquide en le chauffant, par exemple avec des alliages à bas point de fusion) lorsqu'il n'y a pas rotation.

Lorsque le joint est solidifié, la pression peut être beaucoup plus élevée (1 MPa et plus). Cela est appliqué sur certains réacteurs nucléaires.

7.3.1.4 Par liquide magnétique

Il s'agit d'un liquide qui contient, en suspension, une poudre très fine magnétique (ferrofluide). Si un champ magnétique le traverse, ce fluide acquiert une *rigidité* qui s'oppose à la pression dans le sens axial mais autorise la rotation avec un couple faible (figure 83).

Ce type d'étanchéité permet des vitesses importantes, allant jusqu'à des milliers de tours par minute, et des pressions dépassant 1 MPa. Il est appliqué actuellement surtout dans le vide et aux très basses températures (cryogénie).

7.3.2 Par joints

Ce qui différencie fondamentalement les joints pour mouvements tournants de ceux pour translation, c'est le fait que la surface mobile sur laquelle ils assurent l'étanchéité est pratiquement toujours la même. Cela a des conséquences très importantes du point de vue de l'usure, du dégagement et de l'évacuation de la chaleur. En outre, les vitesses atteintes peuvent être beaucoup plus élevées. De plus, l'étanchéité peut être réalisée, soit directement sur l'arbre (**joints radiaux**), soit en dehors de l'arbre en dynamique mais suivant une direction parallèle à l'axe de l'arbre (**joints axiaux**).

Un joint pour mouvement tournant qui est utilisé dans des conditions de vitesse de rotation périphérique et sous une pression du fluide déterminée peut fonctionner avec d'autres caractéristiques à condition de respecter le produit (pression \times vitesse) égal à une constante, produit désigné par PV (exprimé en $\text{MPa} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$). Cela n'est vrai que dans des conditions bien déterminées, en particulier lubrification, dureté et rugosité de l'arbre, etc., et pour une durée de vie bien définie. En outre, il y a une limite pour la pression et pour la vitesse. Ce produit est intéressant à connaître car il caractérise bien un joint, toutefois il ne faut pas attacher une trop grande précision à cette valeur dont on ne connaît souvent que l'ordre de grandeur.

7.3.2.1 Matériaux pour joints en rotation

Les mêmes matériaux que pour les joints pour mouvement de translation sont utilisés dans la réalisation des joints pour mouvement tournant. Il faut noter en plus, pour les garnitures mécaniques, des revêtements du type carbure (nickel, tungstène, etc.) ou nitrure, ainsi que des céramiques.

7.3.2.2 Formes des joints radiaux

7.3.2.2.1 Joints toriques

Le joint torique à section circulaire convient pour des vitesses lentes (inférieures à $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) et pour des pressions élevées (jusqu'à 10 MPa).

L'ordre de grandeur du facteur PV est de 1 pour des durées de vie de l'ordre de 200 à 500 h et de 0,1 pour des durées de l'ordre de 5 000 h, cela avec une lubrification abondante à l'huile et avec un diamètre d'arbre d'environ 30 mm. En effet, la section de l'arbre permet l'évacuation d'une partie de la chaleur qui varie suivant le carré du rayon. Un arbre de gros diamètre permet donc un meilleur facteur PV .

Le montage doit être particulier : le joint torique est toujours logé dans une gorge usinée dans l'alésage ; il subit au montage une compression périphérique d'environ 5 % ; le diamètre intérieur du joint libre est donc supérieur de 5 % à celui de l'arbre. De même, il est soumis à une compression transversale de 5 % s'exerçant sur sa section ; la profondeur de la gorge doit être inférieure de 5 % au diamètre du joint libre.

Pour connaître les variations engendrées par ces compressions, on peut utiliser le tableau ci-après ou *règle de Guldin* : la modification d_g de la section du tore d_j est fonction de la contraction ou de l'allongement D_{mg} du diamètre moyen D_m ($D_m = d_1 + d_j$ et d_1 diamètre intérieur du joint), telle que :

| D_{mg} en % de D_m | d_g en % de d_j |
|---------------------------|------------------------|
| 99 | 100,503 |
| 98 | 101,015 |
| 97 | 101,535 |
| 96 | 102,062 |
| 95 | 102,598 |
| 90 | 105,409 |
| 85 | 108,465 |
| 80 | 111,803 |

Exemple : soit un joint torique de diamètre moyen $D_m = 30$ mm et de diamètre de corde libre $d_j = 3$ mm. Si l'on comprime de 5 % le diamètre moyen, il devient D_{mg} :

$$D_{mg} = \frac{95 \times 30}{100} = 28,5 \text{ mm}$$

et le diamètre de corde d_j devient d_g (tableau ci-avant) :

$$d_g = \frac{3 \times 102,598}{100} = 3,078 \text{ mm}$$

et par suite les diamètres extérieur et intérieur respectivement 31,578 mm et 25,422 mm.

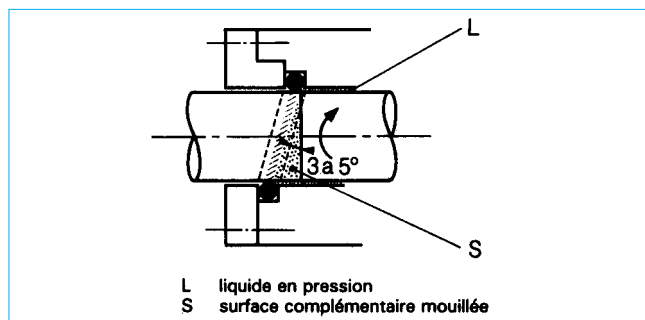


Figure 84 - Montage d'un joint tournant dans une gorge inclinée

Le couple C_{jt} donné par un joint torique en rotation est sensiblement égal à :

$$C_{jt} = C_0 + C_p$$

avec

$$C_0 = \frac{\pi \alpha d_j d^2}{2}$$

α est un coefficient donné par la figure 51a et il dépend lui-même du coefficient ξ de compression radiale du joint calculé par :

$$\xi = 100 \left[\left(\frac{2 D_m}{d + D_g} \right) 1/2 - \frac{D_g - d}{2 d_j} \right]$$

et de

$$C_p = \pi k_p \cdot P \cdot d_j (d + d_j)$$

avec k_p coefficient qui dépend de la nature de l'élastomère, de sa dureté, du rapport d_j/d et de la lubrification. Pour une dureté de l'ordre de 80 Shore, avec de l'huile, k_p est voisin de 10^{-4} .

Un montage intéressant consiste à placer le joint torique dans une gorge légèrement inclinée par rapport à l'axe de l'arbre (angle de l'ordre de 5°). La surface frottante de l'arbre (figure 84) est mieux lubrifiée et se renouvelle devant le joint. La durée de vie est très nettement augmentée. Le joint torique à section quadrilobe peut être utilisé pour des mouvements de rotation avec un montage identique à celui du joint à section circulaire ; ses performances sont comparables, même un peu supérieures.

7.3.2.2.2 Joints composites

Constitués par une bague en matériau plastique (principalement en PTFE chargé) frottant sur l'arbre et un joint torique statique, ils assurent de bonnes performances en mouvement de rotation.

Pour des durées de vie de l'ordre de 1 000 à 5 000 h, le facteur PV est d'environ 2, la vitesse limite de $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et la pression de 8 MPa. Toutefois, ces joints nécessitent un excellent centrage de l'arbre, le faux-rond devant être inférieur à 0,01 à 0,02 mm.

7.3.2.2.3 Joints à lèvres

Ils sont très courants. Ils sont constitués par une armature métallique de section en L sur laquelle est surmoulée une partie en élastomère dont la forme de base est celle donnée en figure 85, avec de nombreuses variantes de détail. L'étanchéité a lieu sur la lèvre dont la section en contact avec l'arbre doit être très faible.

Il existe aussi des joints qui peuvent être montés sur l'arbre et qui assurent le mouvement relatif sur l'alésage.

Le facteur PV des joints à lèvres dépend de l'élastomère utilisé. Il est de l'ordre de 0,5 pour des joints en nitrile avec une vitesse périphérique maximale de $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et de 1,5 pour des joints en élastomère fluoré avec une vitesse maximale de $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Leur tenue en pression est très faible, normalement inférieure à 0,05 MPa. Toutefois il est possible de les faire travailler jusqu'à 1 MPa, les

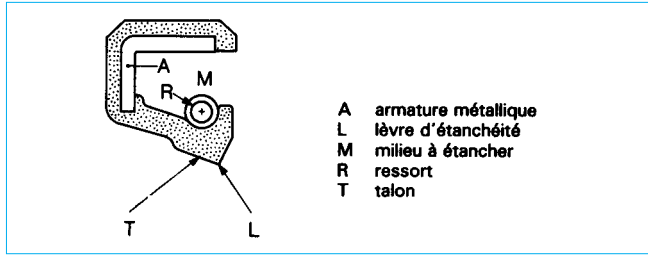


Figure 85 – Section d'un joint à lèvres

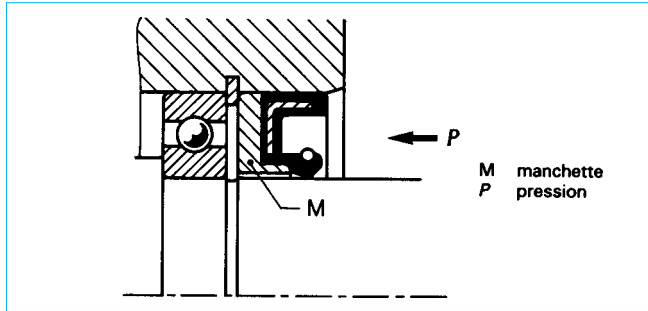


Figure 86 – Joint à lèvres pour pression moyenne

vitesse ne dépassant pas alors quelques mètres par seconde, en utilisant une manchette de soutien (figure 86).

Les joints à lèvres nécessitent de ne pas dépasser certaines valeurs de défauts, en particulier du point de vue de l'excentration et du faux-rond (ou fouettement de l'arbre). Les valeurs maximales sont données sur la figure 87 en fonction soit du diamètre, soit de la vitesse de rotation de l'arbre, respectivement pour ces deux défauts.

De même, la rugosité de l'arbre doit être assez faible mais pas trop, car il y a alors risque d'usure prématurée. La figure 88 donne la zone de rugosité la meilleure. De même, il est nécessaire de pratiquer une rectification en plongée au droit de la lèvre.

La dureté doit être importante, toujours supérieure à HV 600.

Il est parfois intéressant de rapporter une bague traitée sur l'arbre (figure 89), qui peut être alors constituée d'un matériau quelconque et qui permet un changement facile en cas d'usure prématurée.

La puissance dissipée par un joint à lèvres n'est pas négligeable et peut être estimée à l'aide des courbes de la figure 90.

Les joints à lèvres ont un fonctionnement amélioré, en particulier une durée de vie augmentée, si des petites rainures obliques par rapport aux génératrices de l'arbre sont faites au voisinage de la lèvre (figure 91). Ces rainures produisent un refoulement du liquide qui tend à s'échapper et assurent une amélioration de la lubrification de la lèvre lorsque se produit ce régime hydrodynamique. Enfin, suivant le même principe qu'avec le joint torique monté dans une gorge inclinée (figure 84), la lèvre peut avoir un déve-

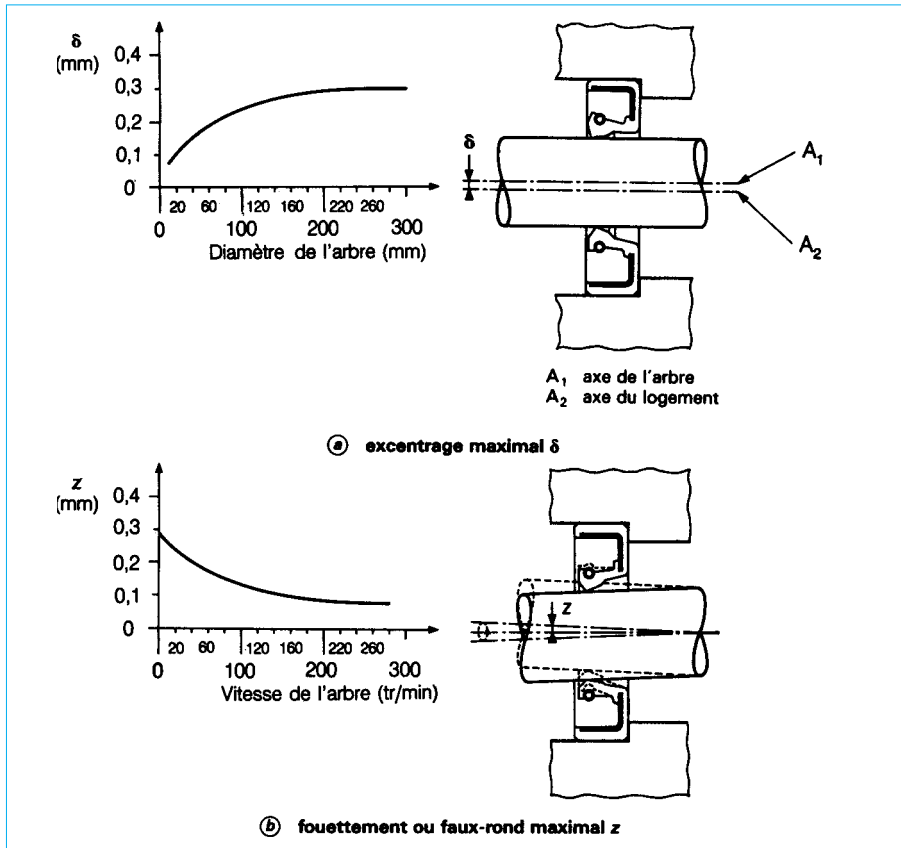


Figure 87 – Excentration et fouettement maximaux d'un joint à lèvres

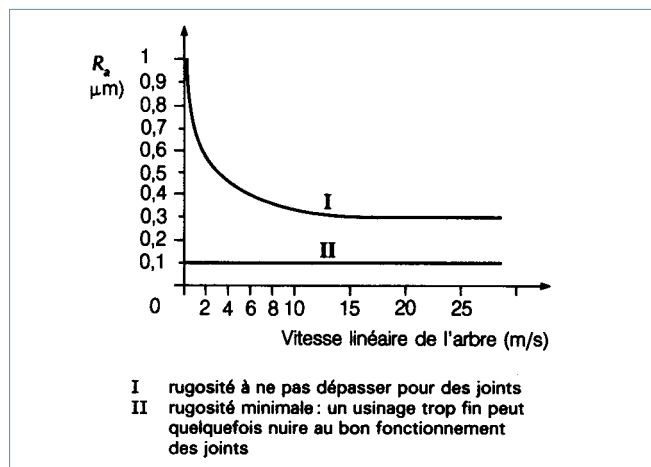


Figure 88 – Rugosité recommandée de l'arbre pour un joint à lèvres

loppé sinusoïdal : c'est le joint à vague (figure 92), qui se traduit par un meilleur refroidissement, moins de friction, grâce à une lubrification améliorée.

7.3.2.2.4 Tresses ou garnitures

Les tresses utilisées en mouvement de translation peuvent l'être aussi en mouvement de rotation. Par suite de l'échauffement localisé, il est presque toujours indispensable d'avoir une injection de

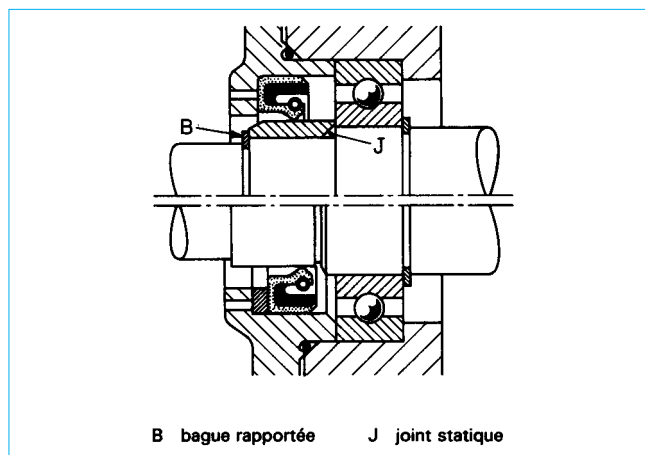


Figure 89 – Étanchéité sur bague rapportée

lubrifiant en milieu de garniture (figure 93), qui est donc constituée de deux demi-parties séparées par une bague. En outre, il y a intérêt, surtout si la vitesse et la pression sont relativement élevées, à extraire la chaleur de frottement par une chemise d'eau qui enveloppe les garnitures (figure 94).

Les tresses permettent des produits PV de 10 avec une vitesse périphérique de $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et une pression maximale de 10 MPa.

Elles sont beaucoup utilisées dans les pompes centrifuges.

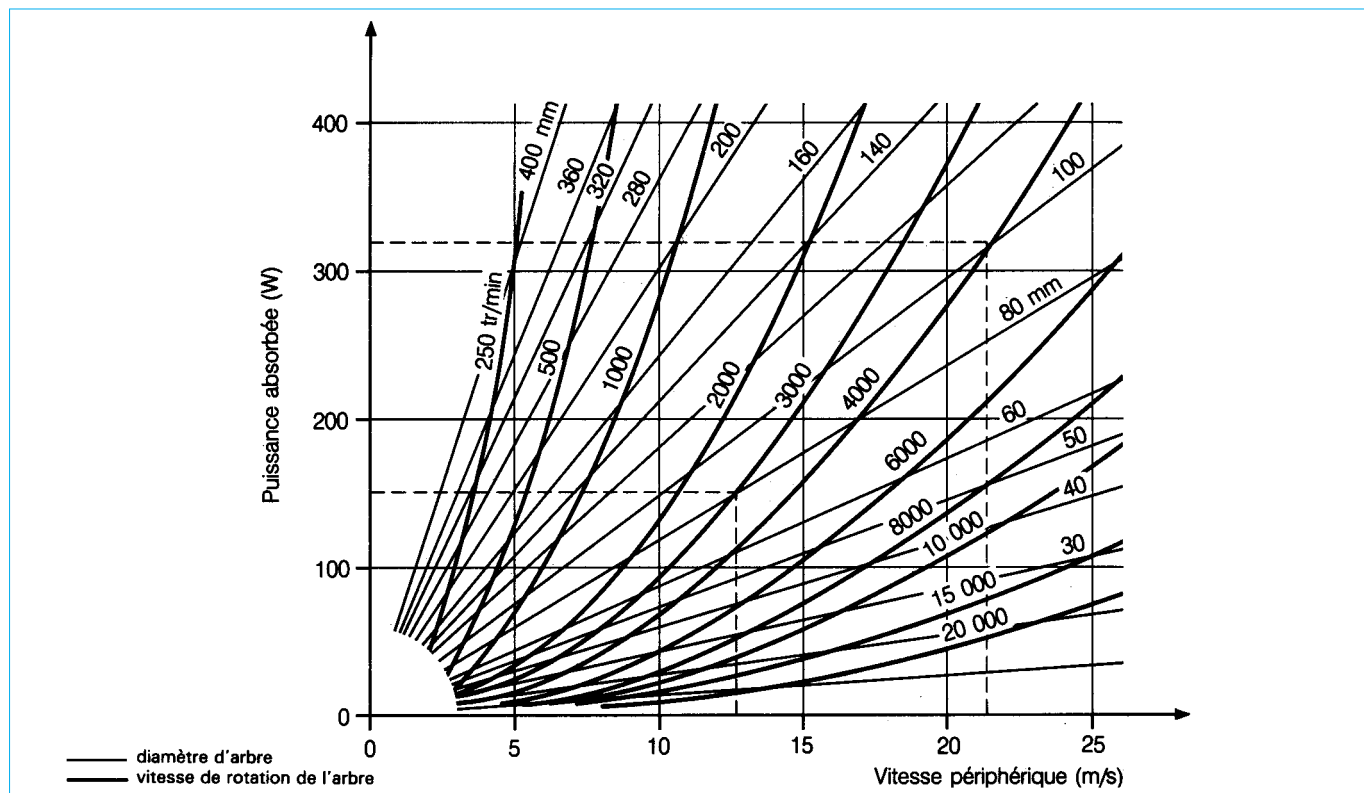


Figure 90 – Puissance dissipée par un joint à lèvres (avec huile SAE, 20 à 100 °C) (d'après doc. SIMRIT)

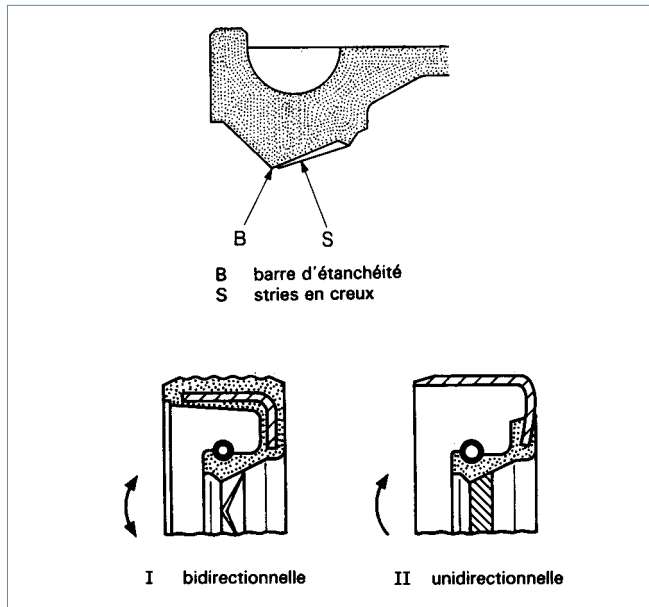


Figure 91 – Joint à lèvres avec stries

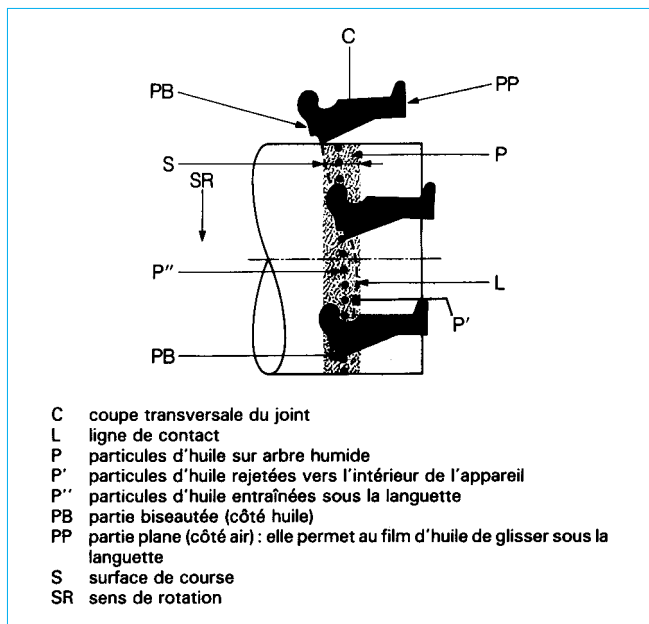


Figure 92 – Joint à lèvres à vague

7.3.2.2.5 Anneaux

Les plus courants sont dits *joints à coins*. Ce sont des anneaux constitués par des secteurs cylindriques dont le nombre augmente avec le diamètre de l'arbre. Les extrémités de chaque secteur possèdent de larges chanfreins permettant l'interposition de coins (figure 95). Secteurs et coins sont maintenus ensemble par un ressort périphérique. Afin d'empêcher la rotation du joint sur l'arbre, des pions sont positionnés sur les faces latérales du boîtier, en regard d'encoches usinées dans les secteurs.

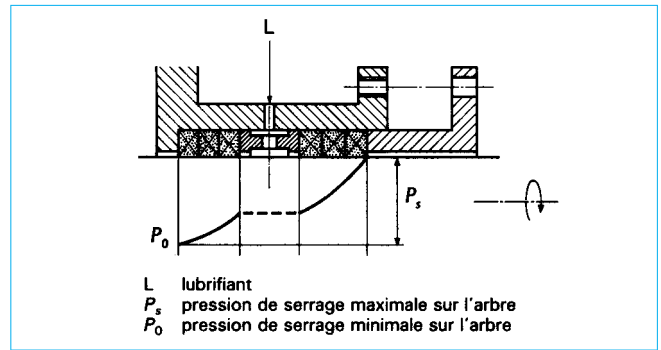


Figure 93 – Presse-garniture avec injection de lubrifiant

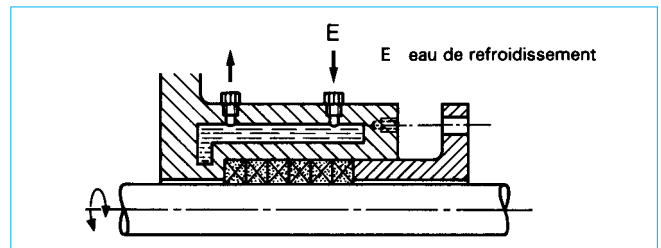


Figure 94 – Presse-garniture avec chemin de refroidissement

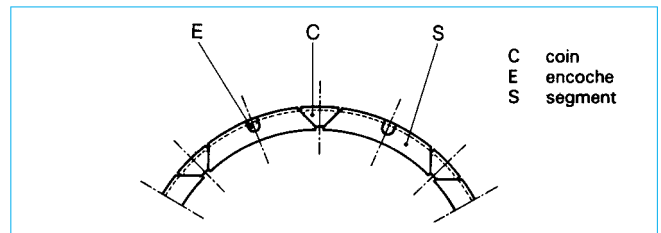


Figure 95 – Joint à anneaux du type coin

Pour obtenir l'étanchéité sur la face latérale du boîtier, on utilise des ressorts de compression qui appliquent les anneaux sur les faces du boîtier (figure 96). De plus, les anneaux sont montés deux par deux de telle sorte que les coins d'un joint soient positionnés en regard des secteurs de l'autre joint.

Ces anneaux sont généralement réalisés en carbone pur ou chargé. Ils sont destinés à des étanchéités destinées surtout aux liquides (quelquefois à la vapeur) pour des grands diamètres (jusqu'à 1,5 m et plus) et pour des vitesses de rotation peu élevées (200 à 300 tr · min⁻¹).

Leurs applications principales sont les turbines hydrauliques et les arbres de bateau.

7.3.2.3 Formes des joints axiaux

7.3.2.3.1 Joints V

C'est un anneau en élastomère de section trapézoïdale serré sur l'arbre et terminé d'un côté par une forme de tronc de cône qui vient s'appliquer sur une surface normale à l'arbre et qui constitue la jonction d'étanchéité (figure 97a). Parfois la section est un peu différente, avec une lèvre d'étanchéité (figure 97b). Ces joints fonctionnent avec des vitesses périphériques allant jusqu'à 15 m · s⁻¹,

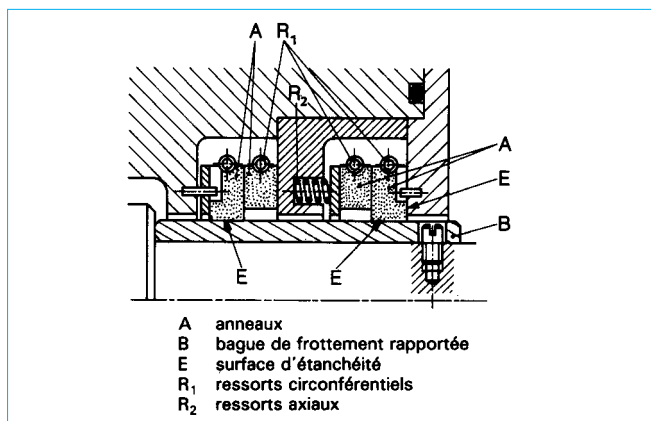


Figure 96 – Joint tournant à anneaux

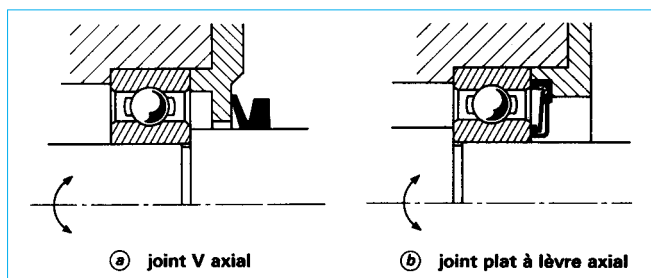


Figure 97 – Joint à lèvres axiales

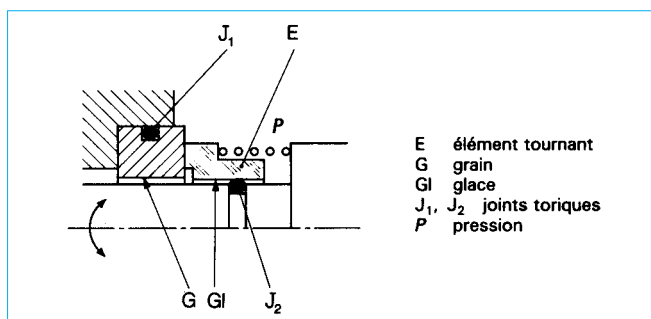


Figure 98 – Garniture mécanique

mais pratiquement sans pression (0,01 MPa) pour des étanchéités à l'huile. Leur utilisation, compte tenu de leur faible comportement en pression, est essentiellement l'étanchéité des roulements ou des paliers.

7.3.2.3.2 Garnitures mécaniques

Une garniture mécanique est un ensemble mécanique assurant l'étanchéité en rotation par deux surfaces planes normales à l'axe de rotation et animées d'un mouvement relatif de l'une par rapport à l'autre.

Elle se compose donc de deux parties principales (figure 98) :

- un demi-joint J₁ solidaire et étanche statiquement de la partie fixe ;
- un autre demi-joint J₂ solidaire et étanche statiquement de la partie mobile.

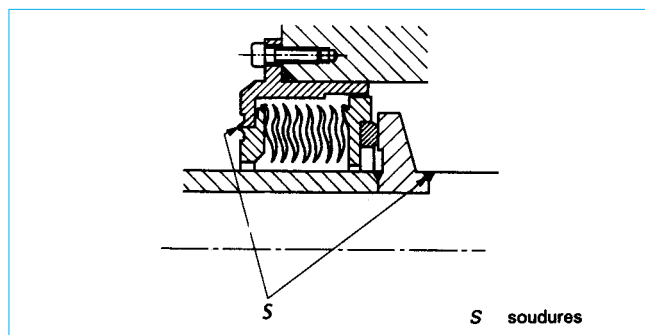


Figure 99 – Garniture mécanique à soufflet soudé

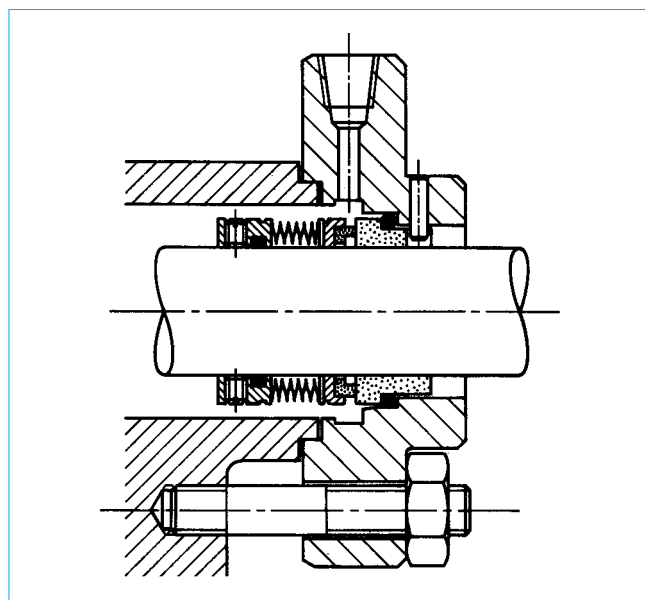


Figure 100 – Garniture mécanique à soufflet et joints toriques

Ces deux demi-parties sont désignées respectivement l'une par *grain fixe*, l'autre par *élément tournant* dont l'élément qui assure l'étanchéité contre le grain s'appelle *glace*. Parfois, l'ensemble tournant peut être l'élément fixe ; le grain est alors mobile par rapport à lui. L'étanchéité statique de ces deux parties est le plus souvent réalisée sur la partie fixe et sur l'arbre par un joint en élastomère. Un ressort appuie l'élément tournant sur le grain pour amorcer l'étanchéité aux faibles pressions. L'élément tournant doit être légèrement mobile dans toutes les directions par rapport à l'arbre de manière à assurer un contact aussi bon que possible entre grain et glace, quels que soient les sollicitations (thermiques en particulier) et les petits défauts de rotation. L'utilisation de joints toriques statiques limitant les possibilités ainsi que celles de l'utilisation de certains fluides ou de températures extrêmes, l'étanchéité de l'élément tournant est parfois réalisée par un soufflet métallique à disques soudés (figure 99), les deux parties de la garniture étant elles-mêmes soudées au boîtier et à l'arbre, ou par une solution mixte, joints toriques et soufflet (figure 100).

La nature des surfaces d'étanchéité ainsi que leur qualité d'exécution sont particulièrement importantes. D'assez nombreux matériaux sont utilisés, le tableau 7 en donne les principaux avec leur domaine d'utilisation. Ces surfaces ont une planéité très bonne,

Tableau 7 – Principaux matériaux frottants pour garnitures mécaniques

| Partie fixe | Partie tournante | Observations | Applications principales |
|--|------------------|---|--|
| Carbone pur ou imprégné de résine ou imprégné de métal | Carbone | Bonne tenue à la corrosion | Industrie chimique |
| | Acier traité | Assez sensible à la corrosion | |
| | Stellite | Très bonne tenue thermique | Petit compresseur frigorifique. Pompe à liquide lubrifiant. Sollicitation thermique importante. Pompe à eau industrielle |
| | Céramique | Bonnes performances. Sensible aux chocs thermiques | Turbine hydraulique. Industrie chimique |
| | Carbure | Performances élevées | Industrie chimique |
| | Nitride | Encore très nouveau, très bonnes performances | Industrie chimique. Vapeur |
| Bronze | Acier traité | Assez sensible à la corrosion. Pour liquide clair et non cristallisable | Petit compresseur frigorifique |
| | Stellite | Pour liquide clair, non cristallisable | Pompe à eau. Turbine hydraulique industrielle |
| Céramique | PTFE | Très bonne tenue à la corrosion. Performances modestes | Industrie chimique |
| | Carbone | Bonne tenue à la corrosion. Bonnes performances | Industrie chimique |
| Carbures (W, Ti, Ni, ...) | Carbone | Bonnes performances | Industrie chimique |
| | Carbure | Grande résistance à l'usure, craint les chocs thermiques | Industrie chimique et pétrole |
| | Stellite | Assez peu utilisé | Industrie chimique et pétrole |
| | Céramique | Sensible aux tensions thermiques | Industrie chimique et pétrole |
| Nitrides | Nitride | Grande résistance à l'usure, très nouveau | Industrie avec forte usure |

souvent contrôlée à la frange d'interférence, la rugosité étant de l'ordre de 0,03 à 0,01 μm .

La pression du fluide applique les deux surfaces l'une contre l'autre avec un effort F (figure 101a) :

$$F = \lambda_1 (S_2 - S_1) P$$

avec λ_1 coefficient compris entre 0 et 1, fonction de la loi de décroissance de la pression entre les rayons r_2 de S_2 et r_1 de S_1 et qui ne semble guère s'écarter de $0,5 \pm 0,1$. Cette force est répartie sur la surface de contact $S_2 - S_1$. La pression de contact τ est donc très voisine de $\tau = \lambda_1 P$. Pour les pressions élevées (supérieures à 5 MPa) cette pression devient prohibitive. Il y a lieu d'équilibrer le joint, ce qui est facilement réalisé en épaulant l'arbre au droit du joint coulissant C qui assure l'étanchéité entre l'arbre et l'élément tournant (figure 101b). La force F devient alors :

$$F = [\lambda_1 (S_2 - S_1) - (S'_1 - S_1)] P$$

Il est clair qu'une trop grande valeur de S'_1 inverserait le signe de F et ferait décoller le joint.

On définit le coefficient d'équilibrage

$$\mu = \frac{S'_1 - S_1}{S_2 - S_1}$$

égal au rapport de la surface d'équilibrage à la surface de contact.

Cette valeur de μ est d'environ 0,3 pour les largeurs d'appui de grains de l'ordre de 3 mm et décroît jusqu'à 0,15 pour des largeurs de l'ordre de 1 mm.

Le fonctionnement d'une garniture mécanique est satisfaisant à condition de respecter certains impératifs. Le premier est celui d'une lubrification correcte. En effet, en rotation, les deux surfaces

planes ne sont pas directement en contact entre elles, il y a un film hydrodynamique, ou au moins des *épilames*, qui diminue le frottement et l'usure. Il est donc nécessaire que la vitesse ne soit pas trop faible et que le montage soit rigoureux : excentration de l'arbre très faible, bon centrage des éléments les uns par rapport aux autres.

Si le fluide n'est pas un lubrifiant satisfaisant (c'est le cas de tous les gaz, mais aussi de certains liquides), il est nécessaire de monter deux garnitures mécaniques tête-bêche et d'injecter entre les deux un lubrifiant de qualité (figure 102).

Le fluide à étancher ne doit pas venir détériorer les surfaces de frottement, parce qu'il est corrosif, mais aussi parce qu'il contient des particules en suspension. Le montage précédent (figure 102) est alors encore tout indiqué, le lubrifiant étant à une pression légèrement supérieure à celle du fluide à étancher. Il faut aussi veiller au bon refroidissement de la garniture mécanique, ce qui suppose parfois une extraction particulière de la chaleur et en particulier un renouvellement important du fluide de lubrification.

Les garnitures mécaniques assurent une bonne étanchéité. Une garniture qui présente une très légère fuite a souvent une durée de vie nettement plus importante qu'une garniture dont la fuite est sensiblement nulle, car cela signifie qu'il y a bien un film lubrifiant.

Il est possible d'ailleurs de calculer le débit volumétrique de fluide à travers une fente radiale avec un liquide (figure 103) par :

$$Q_v = \frac{\pi R (P_e - P_s)}{6 \eta (R - r)} \cdot \frac{j^3 (R - r)}{R \lg \frac{R}{r}}$$

Les garnitures permettent des performances très élevées, fonction d'ailleurs de la précision de leur réalisation, de la nature des

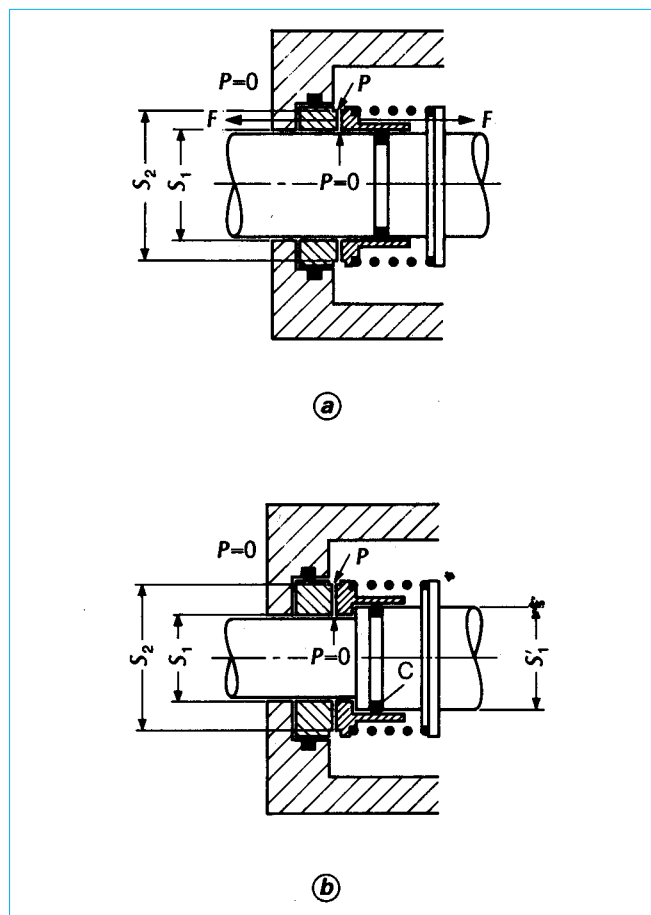


Figure 101 – Action de la pression dans une garniture mécanique

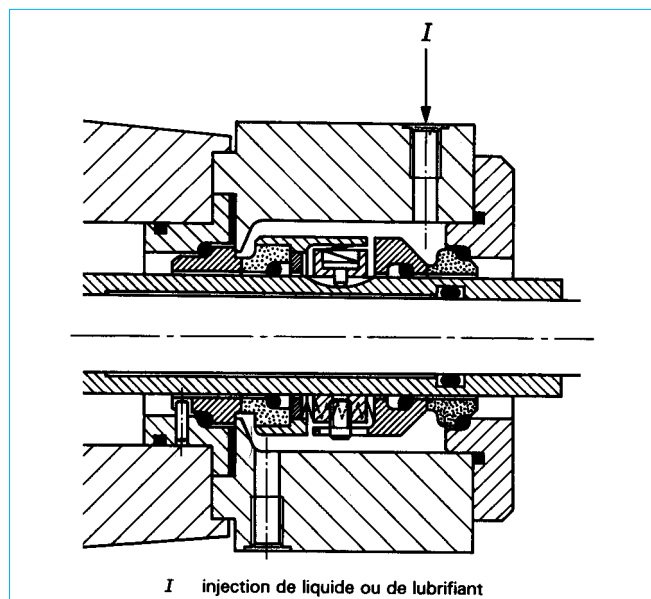


Figure 102 – Garniture mécanique double

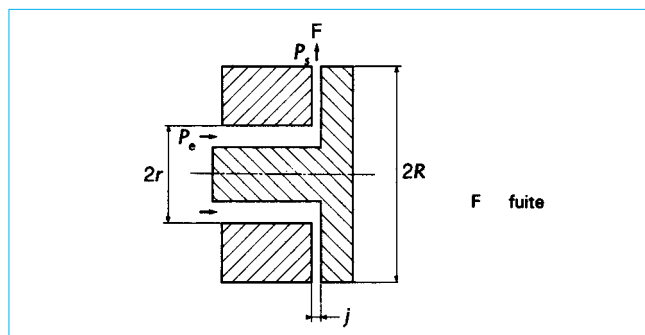


Figure 103 – Fuite par une rainure circulaire radiale

matériaux et donc en définitive de leur prix. Il est possible de les classer en trois catégories :

- applications courantes : PV jusqu'à 1 ;
- applications à bonnes performances : PV jusqu'à 20 ;
- applications à très hautes caractéristiques : PV jusqu'à 300.

Le rapport des prix entre les premières et les dernières peut aller jusqu'à un facteur de 100, à taille égale.

De nombreux constructeurs fabriquent en série des garnitures mécaniques depuis des diamètres de quelques millimètres jusqu'à 500 mm, voire plus. Les applications courantes sont multiples, allant de la machine à laver ou la pompe de voiture au compresseur industriel de plusieurs mégawatts de puissance.

7.3.2.4 Conclusion

Le tableau 8 donne les principaux joints d'étanchéité pour les mouvements de rotation avec leurs caractéristiques.

7.3.3 Précautions à prendre

Pour qu'un joint tournant assure convenablement sa fonction, et avec une durée de vie importante, il est nécessaire de respecter un certain nombre de conditions.

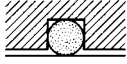

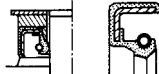




Avec tous les joints, la lubrification doit être abondante en permettant une évacuation de la chaleur, surtout si le produit PV est élevé. Le lubrifiant doit être très propre, il faut éviter toute intrusion de particules solides. L'arbre doit tourner avec une excentricité très faible (souvent inférieure à 0,01 mm, surtout avec les garnitures mécaniques). Le montage du joint doit être soigné ; en particulier, il faut éviter absolument de détériorer, même de manière minime, les parties assurant l'étanchéité dynamique ou statique. Cela suppose la présence de chanfreins de faibles pentes et suffisamment importants aux changements de diamètre de l'arbre sur lequel est monté ce joint. D'une manière générale, toute partie pouvant blesser le joint (trou, filetage, etc.) doit être étudiée dans ce sens. Il s'agit là de causes fréquentes de défauts d'étanchéité.

En ce qui concerne les joints radiaux, l'arbre doit avoir une grande dureté (supérieure à 600 HV).

Des revêtements ou des traitements thermiques permettent d'améliorer la durée de vie, tels le chromage dur, ou la cémentation. Toutefois, certains traitements peuvent avoir un effet négatif suivant la nature du joint et le fluide à étancher.

La rugosité doit être faible (valeur moyenne $R_a = 0,2 \mu\text{m}$). Toutefois, il ne faut pas descendre trop bas, car alors l'usure augmente. De même, il est très souhaitable, pour les joints à faible portée, tels les joints à lèvres (figures 97 et 98), de terminer l'usinage de la partie frottante par une rectification en plongée afin d'éliminer les rayures hélicoïdales qui sont sources de fuite.

Tableau 8 – Joints d'étanchéité pour mouvement de rotation les plus intéressants

| Type | Schéma | Matériaux | Vitesse maximale $m \cdot s^{-1}$ | Pression maximale MPa | Facteur PV maximal (1) $MPa \cdot m \cdot s^{-1}$ | Température maximale $^{\circ}C$ | Observations | Applications | |
|---------|--------------------------------------|--|--|--------------------------|---|-------------------------------------|--------------|--|--|
| Radiaux | Torique (§ 7.3.2.2.1) |  | Élastomère | 0,5 | 10 | 1 | 200 | Bonne lubrification nécessaire. Montage incliné intéressant | Dispositif nécessitant un faible encombrement. Indifférent au sens de pression |
| | Composite (§ 7.3.2.2.2) |  | Élastomère, matière plastique (PTFE) | 2 | 8 | 2 | 220 | Nécessité d'une rugosité très fine. Coût nettement plus élevé que joint torique seul | Dispositif à faible encombrement, faible couple. Indifférent au sens de pression |
| | À lèvres (§ 7.3.2.2.3) |  | Élastomère, acier | 25 | 0,05 à 1 (avec renfort) | 1,5 | 180 | Nécessité d'une bonne lubrification. Rectification en plongée de l'arbre. Prix peu élevé | Dispositif à vitesse élevée mais faible pression. Sortie de boîte de vitesses, arbre de roue, etc. |
| | Tresses (§ 7.3.2.2.4) |  | PTFE, graphite | 20 | 10 | 10 | 400 à 600 | Nécessité d'une période de rodage et d'une reprise de serrage | Pompes rotatives diverses et fluides agressifs |
| | Anneaux (§ 7.3.2.2.5) |  | Carbone, bronze chargé | 15 | 10 | 2,5 | 400 | Assez coûteux et étanchéité souvent avec légère fuite | Pour arbre de pompe à frottement assez faible |
| Axiaux | V (§ 7.3.2.3.1) |  | Élastomère | 15 | 0,01 | 0,1 | 100 | Intérêt pour arbre quelconque, plaque de frottement durcie | Étanchéité de roulement sous faible pression |
| | Garniture mécanique (§ 7.3.2.3.2) |  | Carbone, acier, céramique, carbure, PTFE, élastomère | 100 | 25 | 300 | 400 | Coût assez élevé. Nécessite un très bon montage et bonne qualité de rotation. Lubrification impérative | Emploi étendu pour matériel à performances élevées |

(1) Le facteur PV n'est qu'un ordre de grandeur et sous réserve d'une bonne lubrification et d'une évacuation de la chaleur.

Étanchéité en mécanique

Normalisation

France

Association Française de Normalisation AFNOR

| | | |
|---------------|------------|---|
| NF EN 1779 | Déc. 1999 | Essais non destructifs, contrôle d'étanchéité. Critères de choix de la méthode et de la technique. Indice de classement : A09-105. |
| NF EN 1779/A1 | Juil. 2004 | Essais non destructifs, contrôle d'étanchéité. Critères de choix de la méthode et de la technique. Indice de classement : A09-105/A1. |
| NF A09-106 | Mai 1979 | Contrôle d'étanchéité à l'aide d'ammoniac. Localisation des fuites par pressurisation d'ensemble. |
| NF A09-107 | Mai 1979 | Contrôle d'étanchéité à l'aide d'ammoniac. Localisation des fuites. Méthode à la ventouse. |
| NF EN 1593 | Nov. 1999 | Essais non destructifs. Contrôle d'étanchéité. Contrôle à la bulle. Indice de classement : A09-108. |
| NF EN 1593/A1 | Juil. 2004 | Essais non destructifs. Contrôle d'étanchéité. Contrôle à la bulle. Indice de classement : A09-108/A1. |
| NF A09-493 | Mai 1990 | Essais non destructifs. Contrôle d'étanchéité. Pratiques recommandées pour le contrôle par ressuage sous vide à l'aide d'hélium. |
| NF A09-110 | Oct. 1980 | Contrôles d'étanchéité. Pratiques recommandées pour la recherche de fuites à l'aide de gaz sous pression. |
| NF EN 12756 | Avril 2001 | Garnitures mécaniques d'étanchéité. Dimensions principales, désignation et codes matériaux. Indice de classement : E44-170. |
| NF F20-028 | Mars 1950 | Tampons autoclaves. Joints. |
| NF L40-114 | Déc. 1987 | Aéronautique et espace. Raccordements à étanchéité radiale. Joints toriques. Dimensions. |
| NF L43-603 | Sept. 1974 | Raccordements à bride. Joints toriques. |
| NF L46-323 | Déc. 1980 | Joints plats en élastomère pour chapeaux de protection. |
| NF R93-920 | Déc. 1993 | Véhicules routiers. Joints circulaires d'étanchéité. |
| NF R99-202 | Sept. 1966 | Papiers et cartons pour joints utilisés dans la construction automobile. |
| NFT46-003 | Nov. 1973 | Caoutchouc et élastomères analogues. Essai de dureté internationale des caoutchoucs vulcanisés (30A 94 D.I.D.C). |

| | | |
|-----------|-----------|---|
| NFT46-011 | Déc. 1991 | Caoutchouc vulcanisé ou thermoplastique. Détermination de la déformation rémanente après compression aux températures ambiantes, élevées ou basses. |
| NFT46-013 | Déc. 1985 | Caoutchouc vulcanisé ou thermoplastique. Détermination de l'action des liquides. |
| NFT47-301 | Juin 1972 | Bagues et profilés en élastomère moulés et extrudés pour joints de canalisations. Caractéristiques générales des matériaux. |
| NFT48-001 | Juin 1994 | Feuilles en amiante et caoutchouc comprimés pour joints. Caractéristiques. Marquage et étiquetage. |
| NFT48-101 | Nov. 1994 | Feuilles en amiante et caoutchouc comprimés pour joints. Mesure des dimensions. |
| NFT48-103 | Nov. 1994 | Feuilles en amiante et caoutchouc comprimés pour joints. Détermination de la résistance à la traction. |
| NFT48-104 | Juin 1994 | Feuilles en amiante et caoutchouc comprimés pour joints. Détermination de la perte au feu. |
| NFT48-105 | Nov. 1994 | Feuilles en amiante et caoutchouc comprimés pour joints. Essai d'immersion dans les liquides. |
| NFT48-108 | Nov. 1994 | Feuilles en amiante et caoutchouc comprimés pour joints. Détermination de la tenue au cintrage. |
| NFT48-109 | Nov. 1994 | Feuilles en amiante et caoutchouc comprimés pour joints. Essai de vieillissement accéléré en étuve. |

Normes internationales

International Organization for Standardization ISO

| | | |
|------------|------|---|
| ISO 3601-1 | 2002 | Transmissions hydrauliques et pneumatiques. Joints toriques. Partie 1 : diamètres intérieurs, sections, tolérances et code d'identification dimensionnelle. |
| ISO 5597 | 1987 | Transmissions hydrauliques. Vérins. Logements de joints d'étanchéité pour pistons et tiges de piston. Dimensions et tolérances. |
| ISO 6194-1 | 1982 | Bagues d'étanchéité à lèvres pour arbres tournants. Partie 1 : dimensions nominales et tolérances. |

Index bibliographique

- | | | |
|--|--|--|
| [1] MARTIN (J.). – <i>Manuel de l'étanchéité en mécanique</i> . P.P.I.-C.C.P. 1981. | [7] LEMASSON (G.) et TOURANGEAU (A.L.). – <i>Éléments de construction à l'usage de l'ingénieur</i> . Tome IX. 1964. Dunod. | [12] BUCHTER (H.H.). – <i>Industrial sealing technology</i> . 1979. John Wiley and Sons. |
| [2] BLANC (B.), HENRY (R.P.) et LECLERC (J.). – <i>Guide de l'étanchéité</i> . 1981. SFV. | [8] <i>Traité pratique de technique du vide</i> . Assoc. Nat. Rech. Techn. 1958. | [13] RIOU (J.). – <i>Étude du fonctionnement des presse-garnitures. État au montage</i> . Note Technique n° 14. 1976. CETIM. |
| [3] MAYER (E.). – <i>Garnitures mécaniques d'étanchéité</i> . 1972. Dunod. | [9] DELAFOSSÉ (J.) et MONGODIN (G.). – <i>Les calculs de la technique du vide</i> . 1961. | [14] <i>Fluid sealing</i> . Conférences internationales tous les 2 ans dont les actes sont publiés par British Hydrodynamic Research Association (BHRA). |
| [4] WARRING (R.H.). – <i>Seals and packings</i> . 1979. Trade and Technical Press Ltd. | [10] ROTH (R.). – <i>Vacuum Sealing Technics</i> . 1966. Pergamon Press. | [15] IDELC'IK. – <i>Mémento des pertes de charge</i> . 1969. Eyrolles. |
| [5] WARRING (R.H.). – <i>Seals and sealing handbook</i> . 1981. Trade and Technical Press Ltd. | [11] <i>Les joints d'étanchéité dans la construction mécanique</i> . Mécanique/Matériaux/Électricité n° 265.4. 1972. | |
| [6] ROTHBART (H.A.). – <i>Mechanical design and systems handbook</i> . Section 24 1964. McGraw Hill. | | |