Partie 5 : La Fonction Technique de Base ÉTANCHÉITÉ

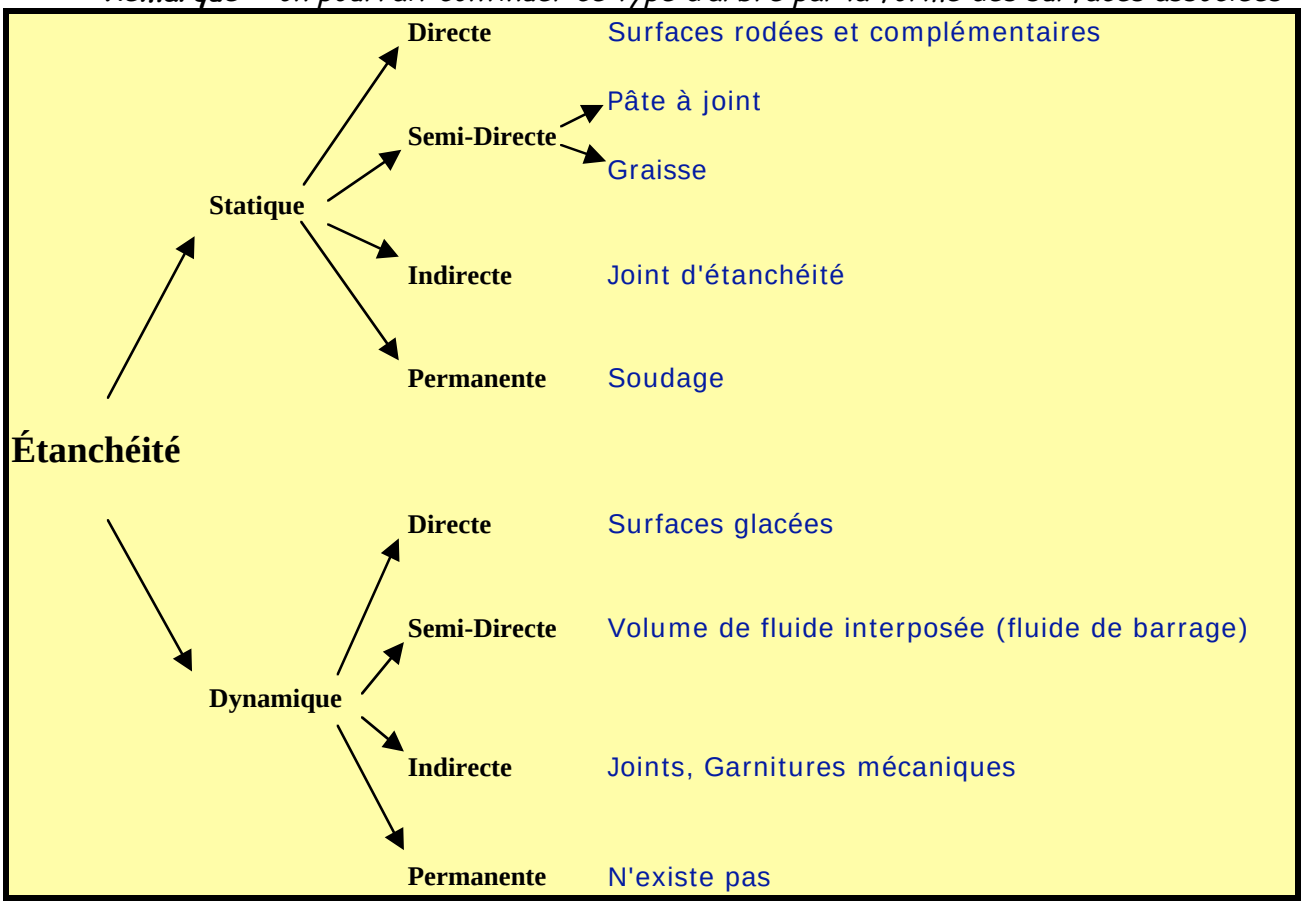
1. Introduction

Les dispositifs d'étanchéité séparent deux espaces de manière qu'aucun liquide ou gaz ne puisse passer de l'un à l'autre. La notion d'étanchéité est très relative car l'étanchéité Dynamique absolue n'existe pas (notion de durée) ; ***c'est un idéal vers lequel tend la technique***.

L'industrie moderne manipule de nos jours beaucoup de produits dangereux (toxiques, inflammables, polluants, radioactifs) qui nécessitent une connaissance beaucoup plus précise des fuites. Le souci d'éviter la pollution de l'environnement et de protéger les personnes conduit à quantifier ces fuites et à leur fixer des limites.

En reprenant l'arbre de classification (Chapitre 4.31), nous pouvons décrire l'ensemble des étanchéités.

Remarque *: on pourrait continuer ce type d'arbre par la forme des surfaces associées*



Pour l'étanchéité dynamique, il est possible de compléter cet arbre en y incluant pour les 3 types existants, la notion de mouvement relatif entre les surfaces (rotation ou translation) et la position de l'étanchéité (radiale ou axiale).

L'étanchéité est un domaine en continuelle évolution, ceci exige une grande expérience : les exemples fournis ne montrent que les techniques courantes utilisées et associées aux principes fondamentaux.

2. Définition d'une fuite, Techniques de recherche d'une fuite

2.1 Définition d'un débit de fuite

Un débit de fuite peut s'exprimer de deux façons :

- Débit massique $\dot{M}_f$
- Débit volumique $\dot{V}_f$

La fuite effective devra être inférieure à une valeur maximale autorisée par les normes et règlements en vigueur soit :

- $\dot{M}_f < \dot{M}_f$ admissible
- $\dot{V}_f < \dot{V}_f$ admissible

Malheureusement il est plus facile de fixer un débit limite que de déterminer un débit de fuite : ceci amène les deux grandes difficultés suivantes :

- Le constructeur ne dispose d'aucune donnée fiable qui détermine une relation entre la fuite et la conception (ou le choix) des dispositifs d'étanchéité.
- La mesure des petites fuites est, très souvent, pratiquement impossible.

2.2 Recherche des fuites

La recherche de fuites est plus complexe qu'il n'y paraît. Pour un liquide, la vérification visuelle au niveau des joints et (ou) raccords permet de constater que les parties extérieures restent sèches. Toutefois, une petite fuite de liquide volatile peut passer inaperçue.

Pour un gaz, le problème est plus ardu, hormis pour la grosse fuite qui se détecte à l'ouie. La recherche de fuite, dans le cas d'une petite fuite de gaz, s'opère en deux temps :

- Vérification de l'étanchéité.
- Localisation des fuites.

Contrôle de l'étanchéité :

Un gaz occupe le volume *Vo* à la pression atmosphérique p_a et à la Température *To* .comprimons le dans une enceinte de Volume Ve initialement à la pression atmosphérique. Après égalisation des températures, sa pression devient :

$$P_o = \frac{Ve + Vo}{Ve} p_a$$

Supposons qu'il existe un débit de fuite $\dot{V}_{fo}$ défini dans l'état initial. Le volume de gaz encore contenu dans le récipient est alors $Vo - \dot{V}_{fo}\, t$ .Si la température du gaz varie au cours du temps (variations climatiques par exemple), et devienne $T = To+\Delta T$, la nouvelle pression dans l'enceinte devient :

$$P = \frac{Ve + Vo - \dot{V}_{fo}\, t}{Ve} \frac{To + \Delta T}{To} p_a$$

Ce résultat montre que la pression *p* dépend de la température T et de la pression p_o (conditions climatiques variables) et peut varier au cours du temps comme le montre le diagramme suivant :

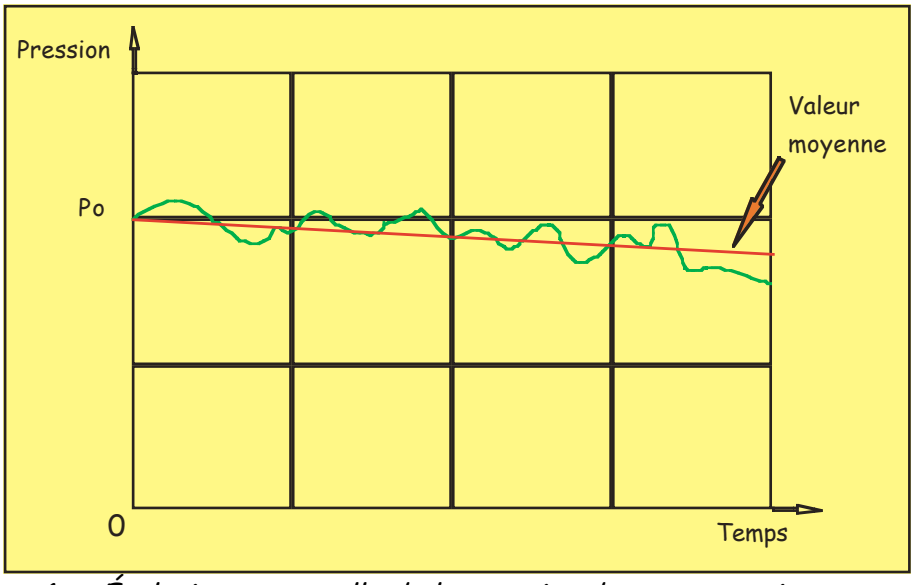


Figure 1 : *Évolution temporelle de la pression dans une enceinte avec fuite*

Cette méthode ne permet de mettre en évidence des fuites minimes surtout sur des grosses installations : problèmes de dilatation des enceintes, variations de pression et de température et durée des mesures pour observer la pente moyenne des mesures effectuées.

On abaisse le seuil de détection d'une fuite en utilisant un montage différentiel (cf Figure 2). On place un petit récipient de référence étanche et rigide à l'intérieur du réservoir principal et on mesure la différence de pression entre les deux volumes.

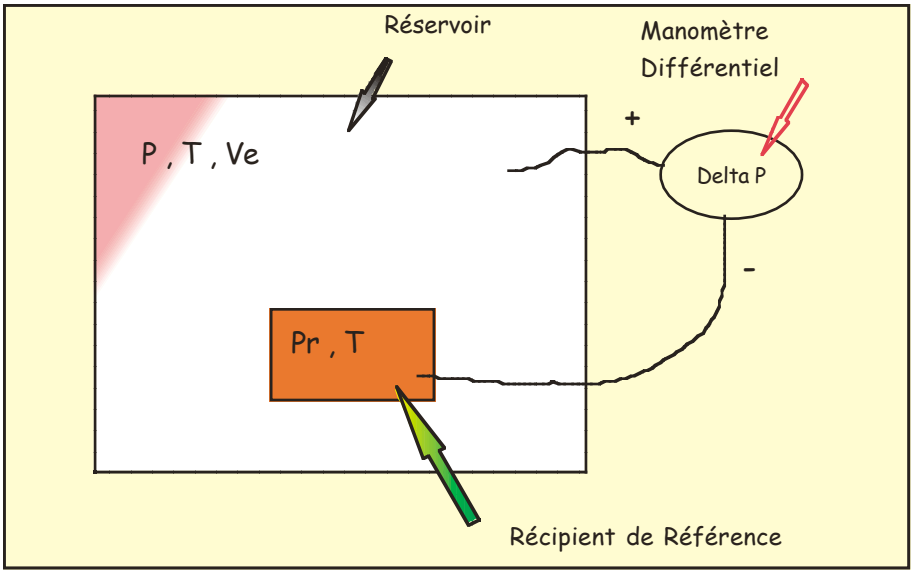


Figure 2 : *Mesure différentielle des variations de pression*

On supposera que la température dans le récipient soit toujours en équilibre avec celle qui règne dans le réservoir, le manomètre indique :

$$\Delta P = \frac{V^{\circ}_{fo}}{Ve+Vo} t \left(1 + \frac{\Delta T}{To} \right) p_a$$

Le manomètre indique une diminution de pression seulement si l'enceinte fuit, on s'affranchit des variations de température et de pression du milieu extérieur.

Pour les grandes enceintes (1000m^3 et plus), la température du gaz n'est pas homogène, donc il sera nécessaire de prendre plusieurs mesures en différents points du volume.

2.3 Localisation des fuites

On découvre les plus petites fuites en revêtant les soudures, joints et endroits critiques avec un liquide pour y déceler les fuites de gaz (apparition de bulles). Une autre méthode consiste à introduire un traceur (gaz type fréon ou hélium) dans le système puis en promenant le long des endroits critiques, une sonde aspirante reliée à un spectrographe de masse : méthode praticable uniquement dans les endroits aérés où le traceur ne peut s'accumuler.

3. Étanchéité statique

3.1 Limitation des fuites

Une étanchéité est dite **statique** lorsque les pièces en contact sont immobiles l'une par rapport à l'autre. Plusieurs solutions peuvent être envisagées pour réaliser cette étanchéité (CF arbre de classification). La première consiste à plaquer deux surfaces de géométrie complémentaires l'une sur l'autre.

Ces deux surfaces pressées l'une contre l'autre se touchent en général par l'intermédiaire de leurs aspérités (notion de rugosité des surfaces en contact), ainsi le fluide peut communiquer d'un espace à l'autre. On peut modéliser cet espace par une fente d'épaisseur équivalente h (dont la valeur sera bien entendu déduite de la rugosité moyenne des pièces en contact) dans laquelle l'écoulement est généralement laminaire. Dans le cas d'un fluide incompressible, en négligeant la pression dynamique due à la vitesse, le débit volumique résulte de la loi de Poiseuille (Voir cours de Mécanique des fluides LA 313 et LA 336).

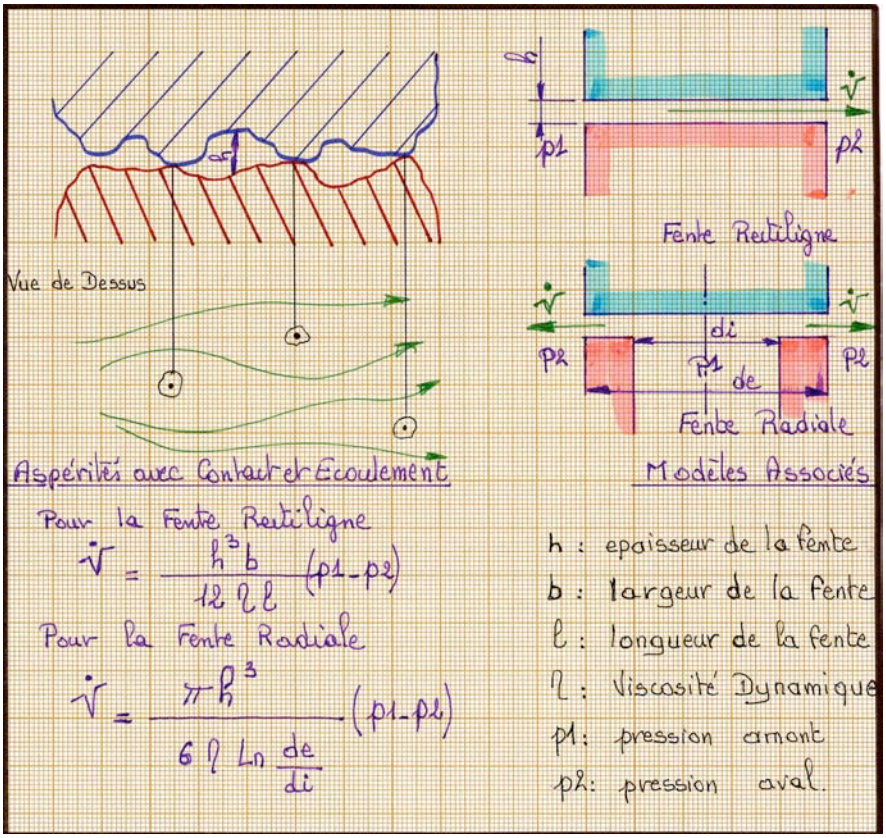


Figure 3 : *Modélisation des fuites de pièces en contact*

3.2 Étanchéité directe

En pressant fortement deux surfaces métalliques l'une contre l'autre, leurs aspérités s'écrasent et les îlots de contact s'élargissent jusqu'à réaliser une bonne étanchéité même à de fortes pressions : les déformations locales des matériaux des surfaces en contact permettent le maintien de cette étanchéité jusqu'à des pressions élevées (2500 bars cf figure 4).

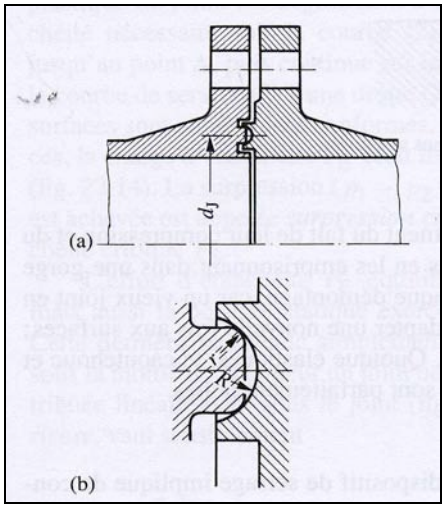


Figure 4 : *Bride DILO : (a) ensemble ; (b) détail du joint*

3.3 Étanchéité indirecte

Principes : Un joint interposé entre deux pièces doit :

- remplir entièrement les dépressions entre les aspérités,
- supporter la pression et la température de service,
- résister à l'agression chimique des fluides à étancher.

Pour obtenir une étanchéité correcte, il faut que :

- le matériau du joint présente un comportement plastique (cf figure 5),
- le matériau soit tendre (élastomère, fibres agglomérées, cuivre recuit, aluminium, fer doux),
- la surface de contact soit étroite afin de pouvoir comprimer le joint avec une pression convenable.

L'épaisseur des joints diminue avec le temps (plastification du matériau, fluage).

On peut limiter le fluage latéral du joint en l'emprisonnant dans une gorge. Lors du démontage d' un ensemble mécanique, il faut absolument remplacer l'ancien joint car celui ci s'est généralement durci et ne peut plus s'adapter aux surfaces. Pour des joints en caoutchouc et élastomères, il faut s'assurer que les surfaces en contact soient polies.

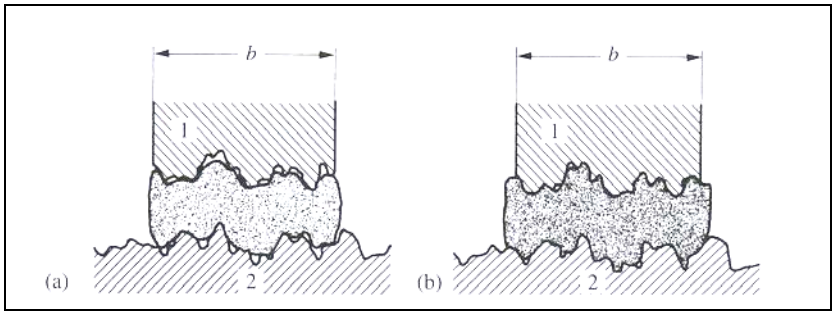
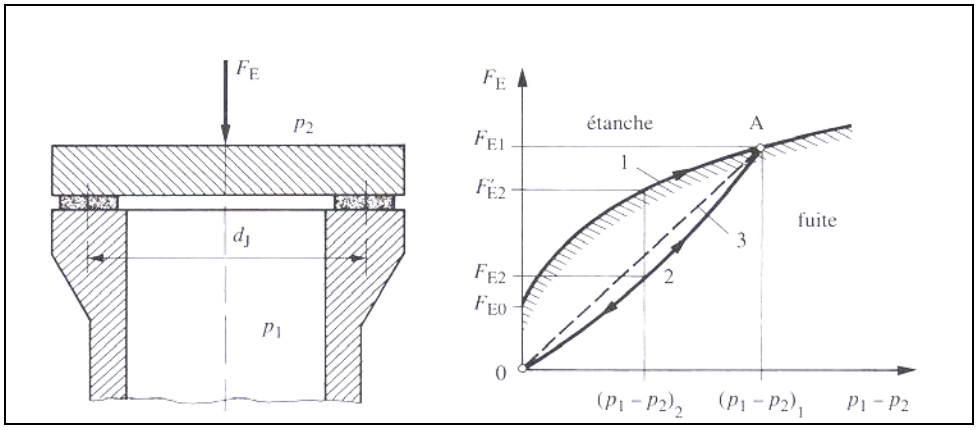


Figure 5 : *Joint d'étanchéité*

Forces mises en œuvre pour garantir une étanchéité :



Le montage de joints plats (cf exemple ci-dessus) entre deux brides implique généralement un serrage par boulons. Celui ci doit respecter les contraintes suivantes :

- Force de serrage nécessaire pour la force d'étanchéité en fonction de la décharge des boulons due à la pression $P_2 - P_1$.
- Échauffement différentiel de la bride et des boulons d'où une différence de température entre les brides et les boulons impliquant une dilatation relative des deux (en général, augmentation du serrage du joint puis retour à un état d'équilibre).
- Si les surfaces géométriques doivent être très précises (plan de joint des carters de Boites de Vitesses automobiles), le joint ne pourra garantir cette géométrie : on remplace alors le joint par un liquide badigeonné sur les surfaces avant montage, remplissant tous les micro-interstices.
- Au cours du temps, il sera souvent nécessaire de resserrer les boulons (fluage du joint)

En général, il convient de resserrer une à deux fois un joint plat après sa mise en service.L'assemblage est pratiquement insensible au fluage du joint si les vis sont suffisamment souples : il convient donc d'utiliser des vis élastiques à haute résistance.

Exemples d'étanchéité :

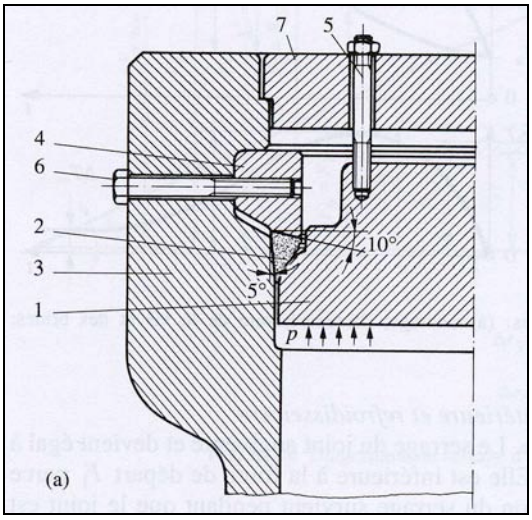


Figure 7 : *Fermeture d'autoclave*

Pour ces mécanismes, on se sert de la pression du fluide pour augmenter le serrage du joint, ce qui permet de conserver des vis de dimension acceptable.

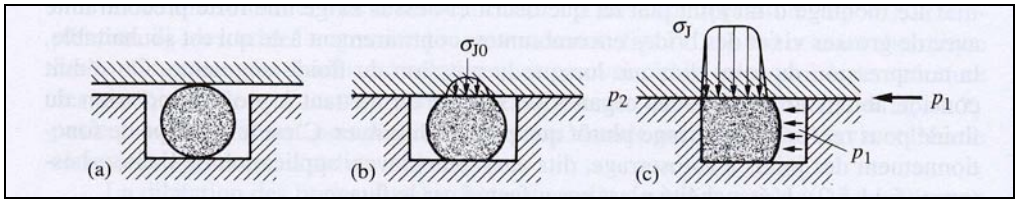


Figure 8 : *Montage d'un joint torique*

Pour le montage de ces joints, lorsque la différence de pression devient très grande et que le jeu entre les deux pièces n'est plus négligeable, les constructeurs préconisent la mise en place de bagues anti-extrusion (cf figure 9).

La mise en place de ces bagues est conseillée à partir d'une différence de pression de 300 bars. Celles ci sont généralement en PTFE (Téflon).

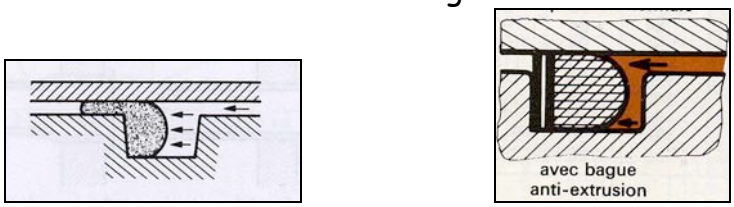


Figure 9 : *Extrusion d'un joint torique*

Joints METAL-O-RING pour fluides et applications sous vide :

Ces joints peuvent être utilisés dans diverses installations décrites ci dessous en fonction du type de joint employé. Les matériaux employés sont multiples (Acier doux, Cupro-Nickel, Cuivre, Acier Inoxydable, Nickel).

Joints pressurisés

Ce sont les joints les plus employés. Les joints pressurisés peuvent être utilisés dans des installations où la pression peut atteindre 420 bar. Ils sont recommandés lorsque les températures atteignent des extrêmes dans les installations.
Les joints sont remplis d'azote, pour assurer des pressions internes de 25 bar dans les joints de cuivre et de 70 bar dans les métaux plus durs.
La pressurisation augmente la résilience du joint pour un intervalle de température très étendu. L'augmentation de la limite apparente d'élasticité du métal du joint est directement proportionnelle à la courbe d'expansion de l'azote. Pour la plupart des applications, une pression interne de 42 bar est suffisante.
La pression interne du joint est déterminée par la température ambiante et la température de l'installation. Il y a ainsi suffisamment de pression à l'intérieur du joint pour assurer l'étanchéité en cas de chute soudaine de la température. Si la température s'élève brusquement, la transmission de chaleur au gaz est suffisamment rapide pour que le joint continue à fonctionner en dépit d'une élévation possible de la pression ou d'une moindre viscosité du fluide de l'installation.

Joints étanches sous pression

Ils sont recommandés dans des installations où les températures ne sont pas aussi élevées et où une étanchéité à très haute pression est nécessaire. Mais les joints étanches sous pression peuvent aussi être utilisés dans des installations où les températures peuvent être aussi basses que 70 bar. Les joints étanches sous pression ont assuré une étanchéité parfaite dans des installations où la pression atteint 10000 bar. L'étanchéité est créée en laissant pénétrer la pression de l'installation à l'intérieur du joint creux par des lumières percées dans la paroi.
Toutefois dans des installations où les températures sont élevées, l'augmentation de la pression dans le système n'est pas toujours suffisante pour compenser la diminution de la limite élastique du joint et on devra alors considérer les joints pressurisés.

Joints creux

Quand cela est nécessaire, les joints creux peuvent être fournis sans azote pressurisé et sans lumières dans les parois.

Joints pleins

Les joints pleins peuvent être fabriqués sous différentes formes, dimensions et métaux. Ils sont principalement utilisés pour donner un support ou un renforcement.
Les applications courantes de ces joints incluent: renforcements de soufflets et d'accouplement flexibles pour éviter tout éclatement et affaissement, tuyauterie marine et passerelle télescopique pour avion.
Les sacs filtrants tubulaires sont aussi renforcés avec des joints torique métalliques très souvent traités contre la corrosion.
Pour assurer l'étanchéité, on utilise des joints en métaux plus doux dans des procédés sous vide et des joints fins plus durs pour soutenir des garnitures fragiles.
La possibilité de pouvoir revêtir les joints de matériaux conducteurs ou résistants chimiquement, permet de les utiliser aussi dans des installations électriques et chimiques.

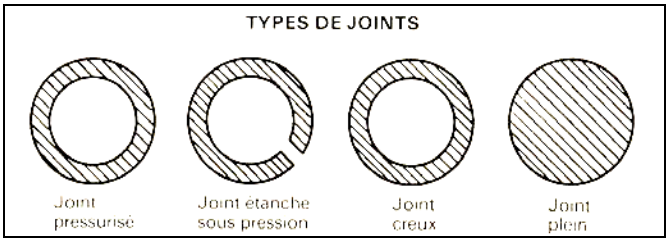


Figure 10 : *Types de joints*

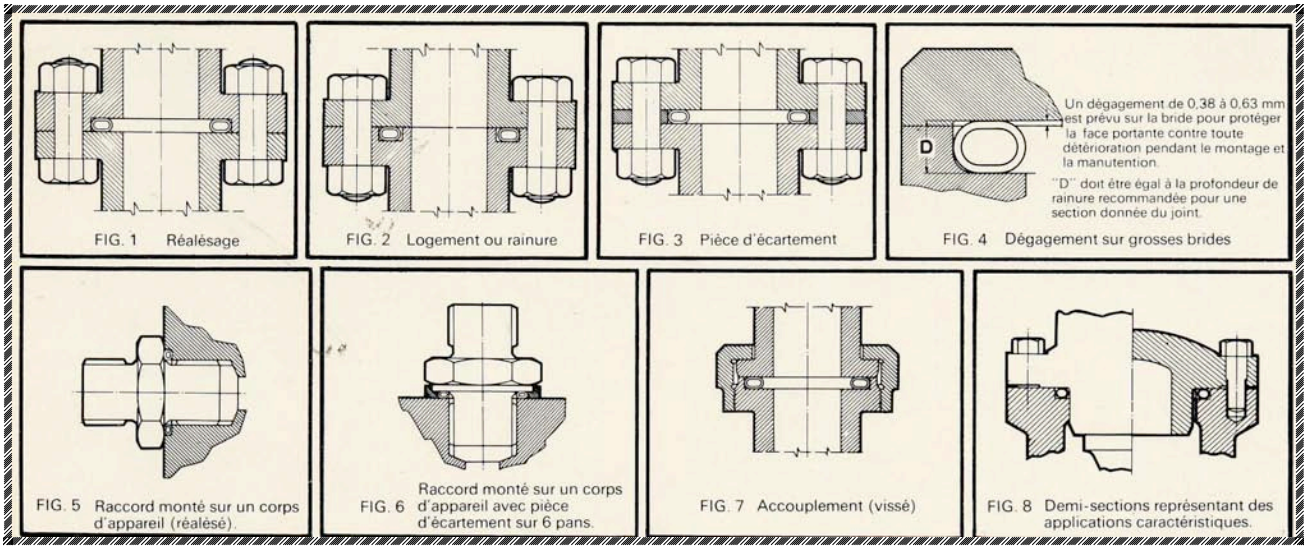


Figure 11 : *Types de montages*

4. Étanchéité Dynamique

Principes :

Une étanchéité est dite dynamique lorsque que les surfaces d'étanchéité sont mobiles . On distingue principalement deux cas suivant le type de mouvement entre les pièces (translation ou rotation).

Translation :

Le mouvement est parallèle au gradient de pression (cf figure 12) : la pièce mobile balaie périodiquement une partie de la surface de la pièce fixe. Si le fluide à étancher est un liquide, il existe toujours un film de quelques microns d'épaisseur qui reste accroché à la surface. En passant dessus, la pièce mobile entraîne une faible quantité de liquide dans son mouvement et agit comme une pompe à viscosité. Le film ainsi réalisé lubrifie les surfaces et de ce fait diminue leur usure. Ce cas se rencontre dans tous les pistons et tiges de pistons (cf figure 13 & 14).

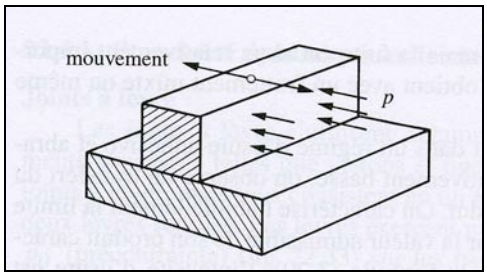


Figure 12 : *Mouvement parallèle au gradient de pression*

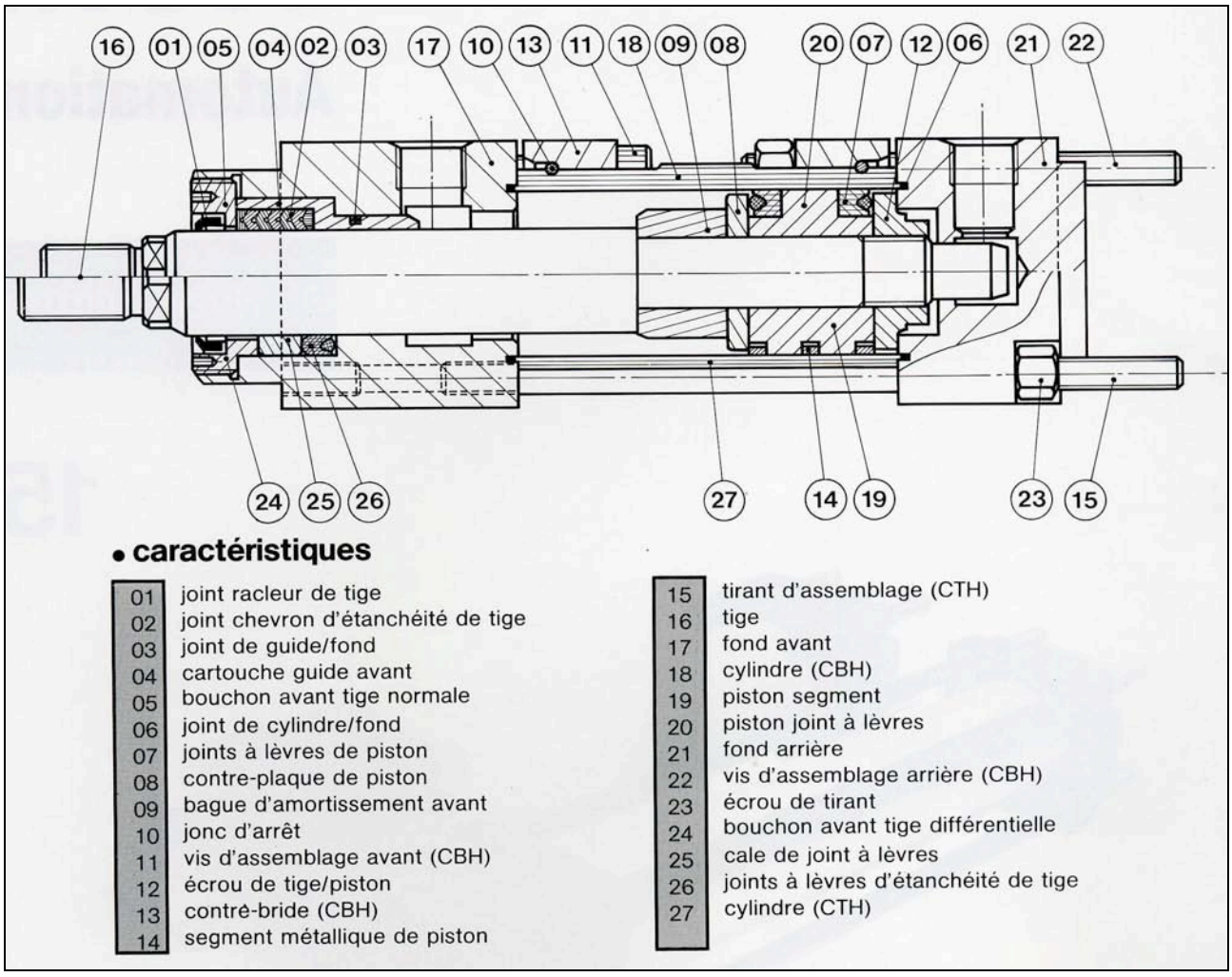


Figure 13 : *Exemple de vérin*

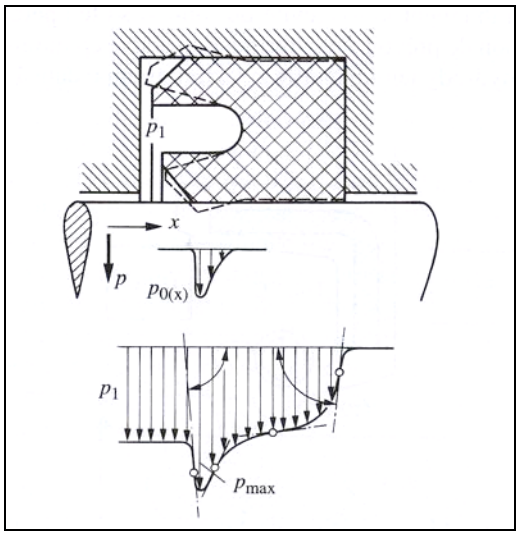


Figure 14 : *Distribution des pressions dans le joint à lèvres*

D'autres types de joints peuvent être employés (joint torique, joint quadring) dont les constructeurs sont donnés dans la bibliographie. En général les vitesses linéaires sont faibles (vitesses inférieures à 3m/s) et il faut s'assurer que le matériau du joint soit compatible avec le ou les fluides à étancher.

Rotation :

En général le mouvement est perpendiculaire au gradient de pression (cf figure 15) :

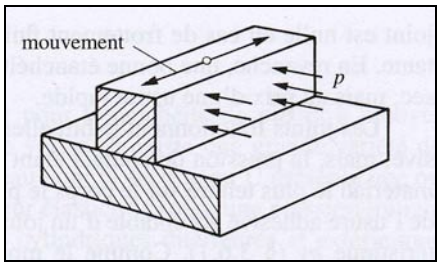


Figure 15 : *Mouvement perpendiculaire au gradient de pression*

Les passages d'arbre à travers des parois (carters) conduisent à un mouvement perpendiculaire au gradient de pression. A défaut de mesures spéciales, les surfaces ne sont pas lubrifiées par le fluide alors que la vitesse relative est souvent très élevée, d'où une usure importante.

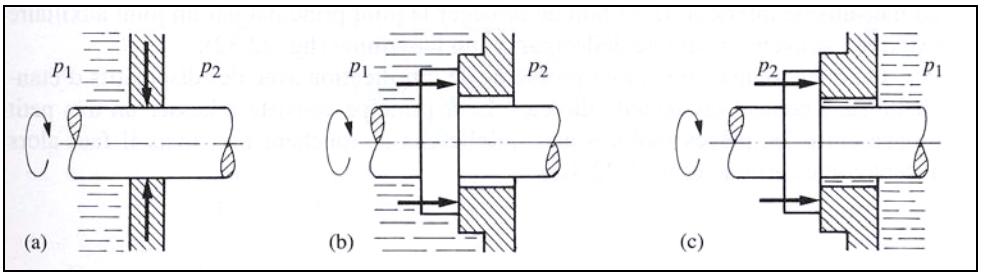


Figure 16 : *Dispositifs d'étanchéités (a) radiale (b) & (c) axiales $p_1 > p_2$*

On peut distinguer deux classes ;

- les étanchéités radiales (surface d'étanchéité cylindrique)
- les étanchéités axiales (surface d'étanchéité plane perpendiculaire à l'axe de rotation) : dans ce dernier cas, l'étanchéité est meilleure dans le cas (b).

Étanchéité dynamique indirecte :

Elle est réalisée par l'interposition d'un joint entre les deux surfaces en mouvement de rotation. Plusieurs problèmes sont à régler :

- Lubrification des surfaces au contact du joint pour diminuer le frottement donc la température (Cf figure 17).
- La protection du joint des agents extérieurs (poussières abrasives par exemple).
- Montage correct du joint pour minimiser le débit de fuite (géométrie des surfaces, ajustement, pression de serrage etc…).

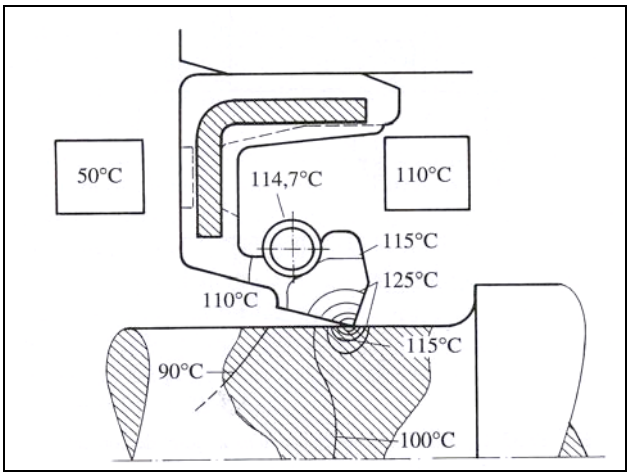


Figure 17 : *Distribution des Températures autour d'un joint à lèvre (Freudenberg)*

Un premier type de joint est le joint à lèvre (axiale ou radiale). Il réalise une bonne étanchéité entre les deux enceintes dans les limites suivantes (pression $p_1 - p_2 <$ 10 bars et $V_{maxi} <$ 5m/s, ces deux caractéristiques étant des valeurs limites indépendantes). Il est utilisé principalement pour des étanchéités d'arbre vis à vis de l'huile d'un carter ; il est précontraint par un ressort à boudin enroulé autour de la lèvre souple qui maintient la pression de contact sur l'arbre malgré l'usure de la lèvre.

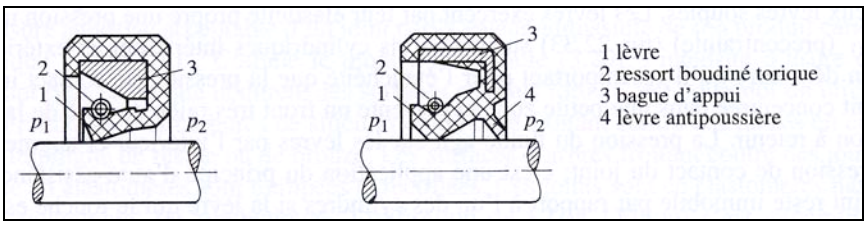


Figure 18 : *Types de joints à lèvre (PAULSTRA)*

Un exemple de montage est donné par la figure 19. Il représente la liaison pivot d'une roue de moissonneuse (Diamètre de roue d'environ 1500 mm) avec la protection par deux joints à lèvres (un radial type PAULSTRA à deux lèvres et un axial de type VRING). Compte tenu du milieu de fonctionnement, une protection par chicane est prévue ainsi qu'une lubrification à la graisse permettant de séparer les deux volumes (milieu extérieur abrasif et carter du réducteur).

Le joint axial est un joint de type VRING, permettant une lubrification de la lèvre par la force centrifuge.

<u>Nota :</u> La représentation du joint à double lèvre est simplifiée.

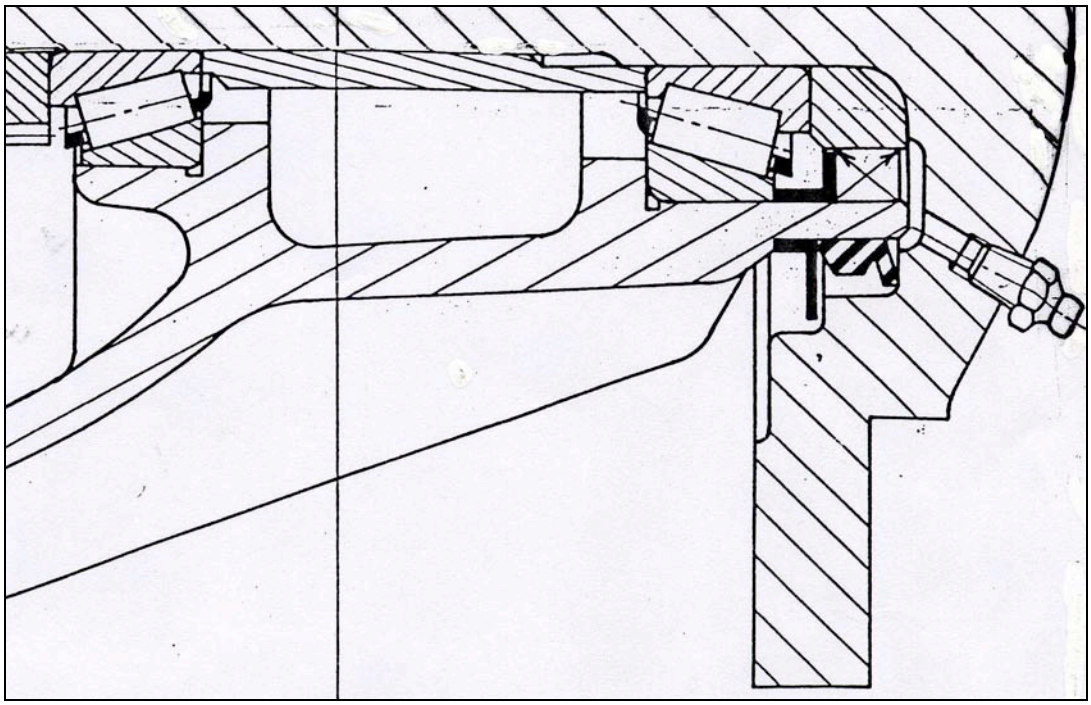


Figure 19 : *Dispositifs d'étanchéités d'une roue de moissonneuse*

On peut aussi trouver des joints doubles pour séparer deux fluides (exemple huile EP et ATF dans une boîte automatique, avec mise à la pression atmosphérique de la cavité située entre les deux lèvres (Cf figure 20).

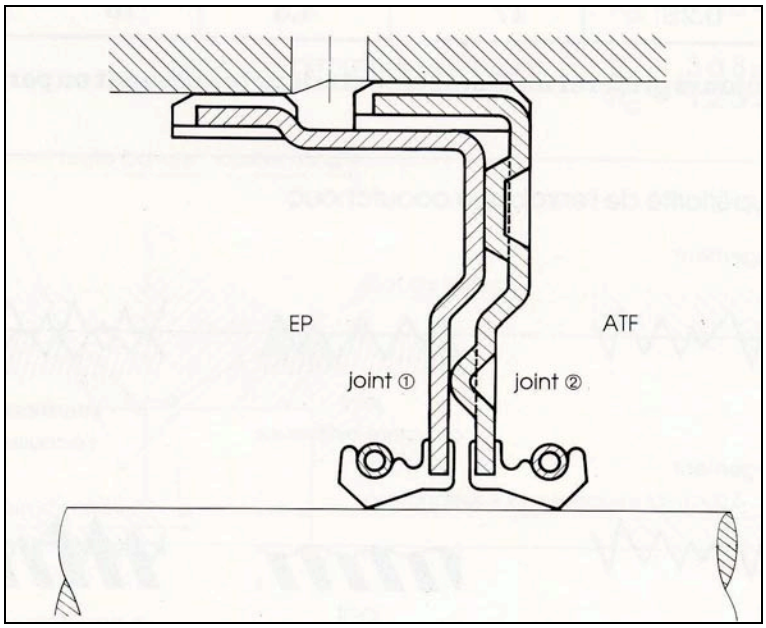


Figure 20 : *Dispositifs d'étanchéités double joint (Document PAULSTRA)*

Un deuxième type de joint est le presse étoupe, dont le principe est donné par la figure 21 : le principe de ces joints est d'interposer une tresse entre l'arbre et l'alésage en lubrifiant celle-ci afin de diminuer les frottements, l'étanchéité dépend de la forme de la tresse et de la pression des vis.

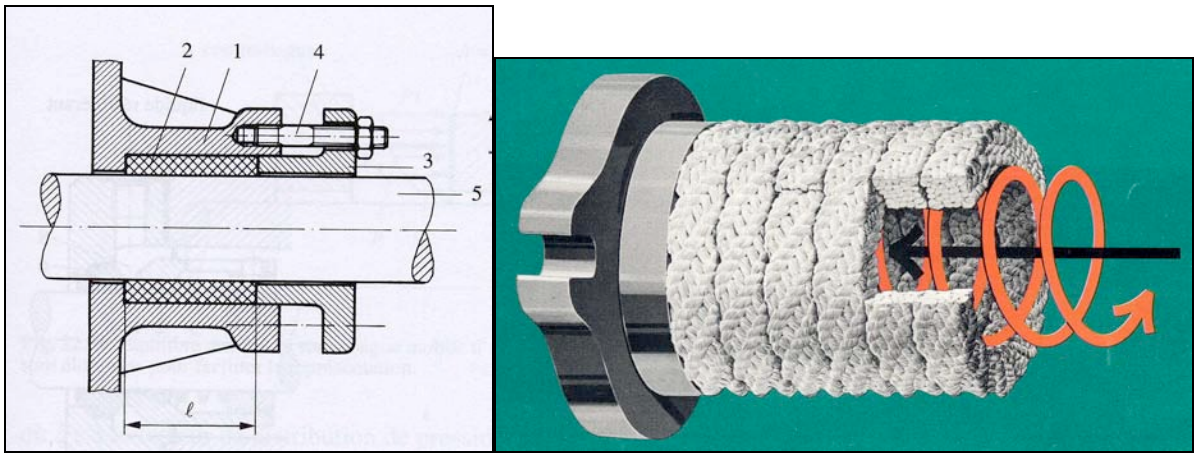


Figure 21 : *Dispositifs d'étanchéités type presse étoupe (montage et tresse)*

Étanchéité dynamique directe :

Les pièces sont en contact par deux surfaces compatibles (cylindre ou plan). Il a été indiqué au paragraphe 3.1, une méthode de calcul du débit de fuite : l'étanchéité directe sera qualifiée par un débit de fuite. L'exemple ci-dessous combine les deux surfaces (cylindre au niveau des pistons et plan au niveau de la glace de distribution .

En général les pistons sont rodés avec les chemises afin d'avoir une géométrie complémentaire et un jeu de fonctionnement le plus faible afin de diminuer les fuites qui peuvent être très faibles si le fluide est très visqueux.Un exemple de ces étanchéités est donné par les figures 22 & 23 (Pompe **CETIM** dont les caractéristiques sont les suivantes : pression maxi de 600 bars en pointe pour une vitesse de rotation maxi de 3200 tours/minutes).

Au niveau des pistons l'ajustement de **18 H5 g5** donne comme jeu :

- mini : **6** microns (0,006 mm) au rayon.
- maxi : **24** microns (0,024 mm) au rayon.

Si on souhaite calculer le débit de fuite, il faudrait prendre une hauteur h qui sera comprise pratiquement entre **1 & 10** microns si on tient compte des déformations relatives des pièces en contact.

Au niveau de la glace de distribution, l'effort presseur est asservi à la pression afin de limiter ces fuites, un ressort servant au démarrage pour appliquer un effort minimal garantissant l'étanchéité.

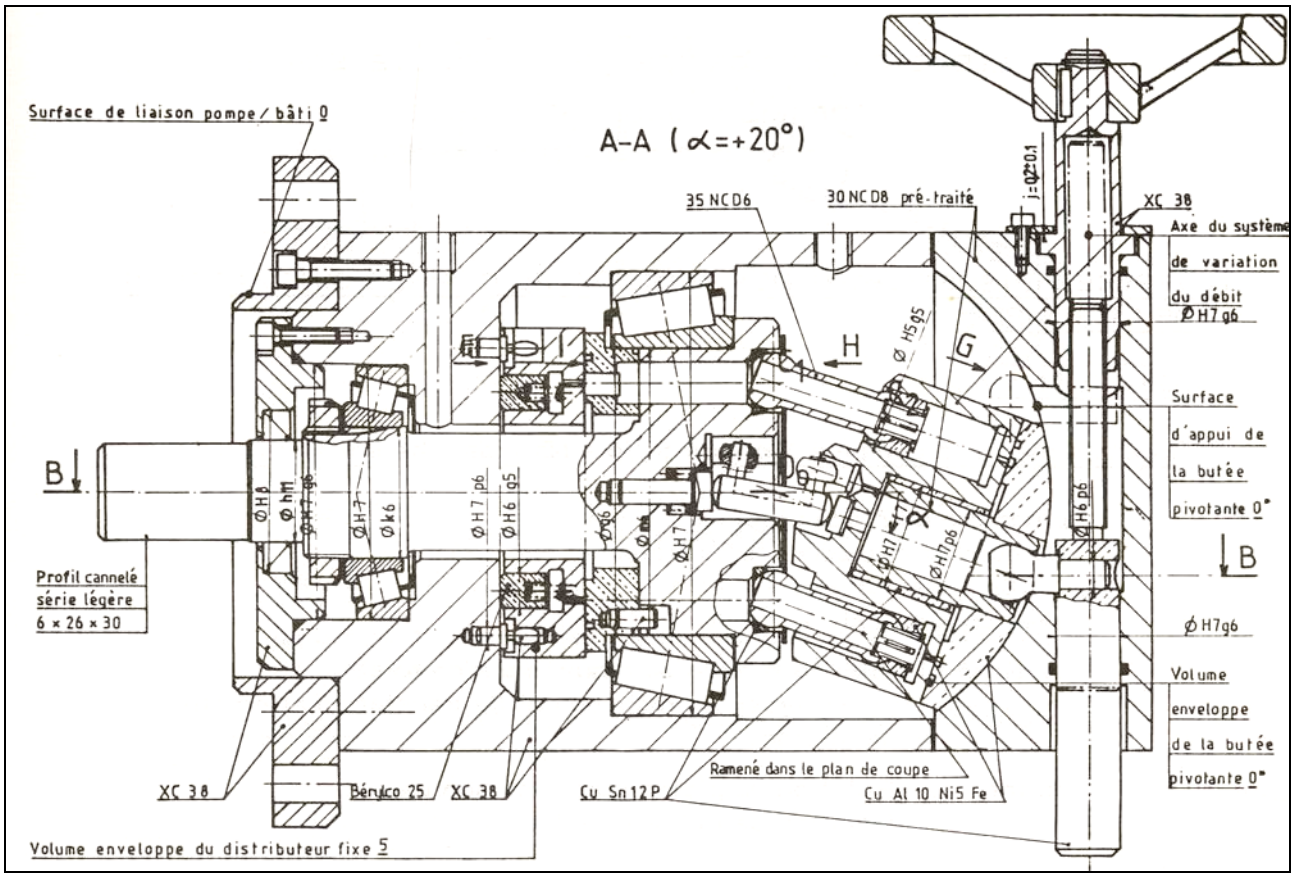


Figure 22 : *Pompe CETIM (Coupe longitudinale)*

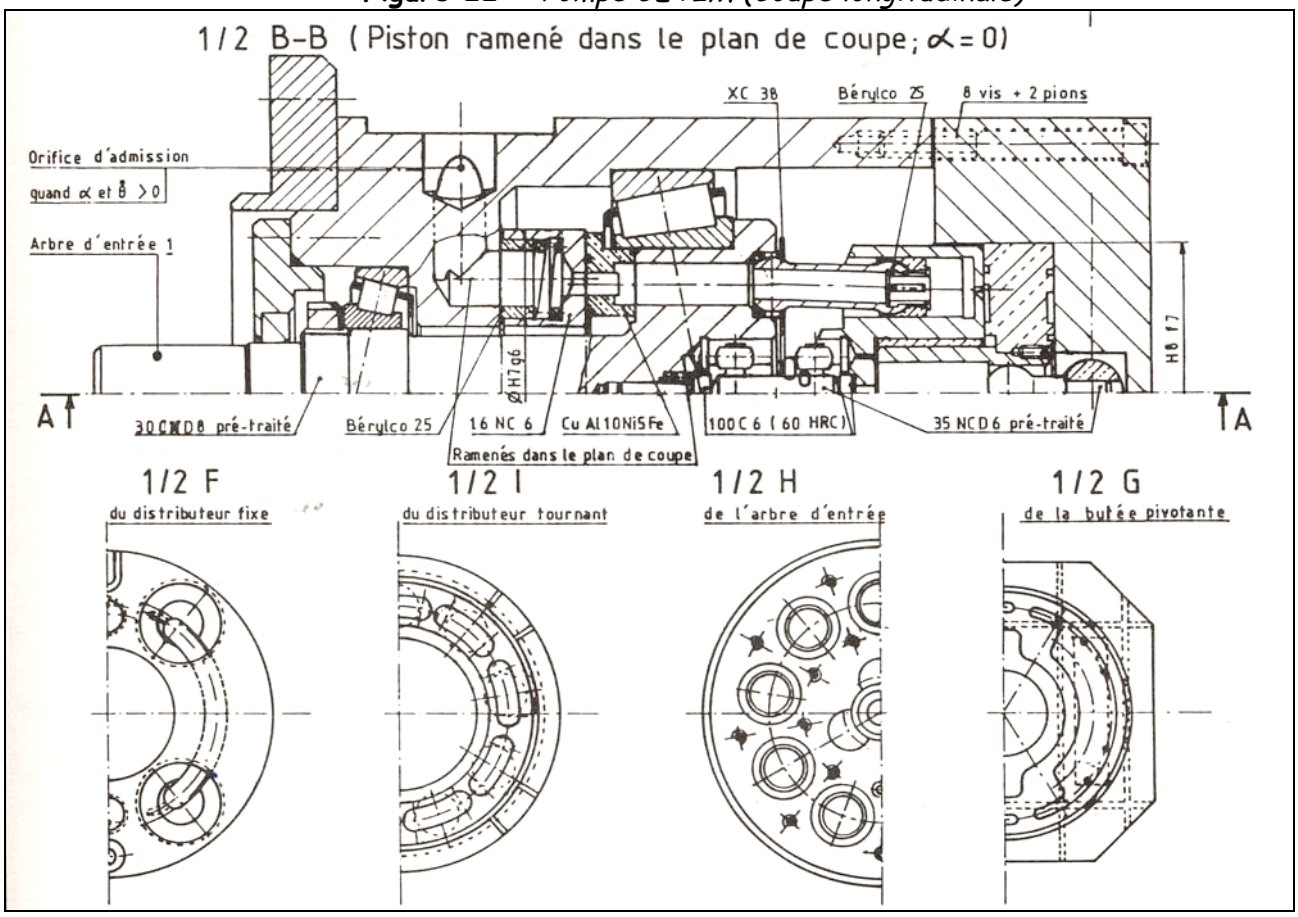


Figure 23 : *Pompe CETIM (Coupe Transversale)*

Étanchéité dynamique semi-directe :

Ici, un fluide est interposé entre les deux fluides à étancher. La pression entre les deux volumes est quasiment nulle. On remplit souvent l'espace avec un liquide ou une graisse pour interdire le passage aux poussières et projections de liquide. Le fluide de barrage doit être compatible avec les différents milieux afin d'éviter toute réaction chimique. Les figures 24 & 25 montrent deux solutions (l'une avec de la graisse, l'autre avec un fluide de barrage).

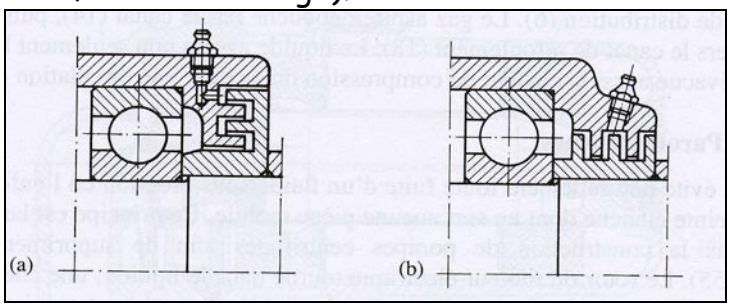


Figure 24 : *Labyrinthes graissés (radial & axial)*

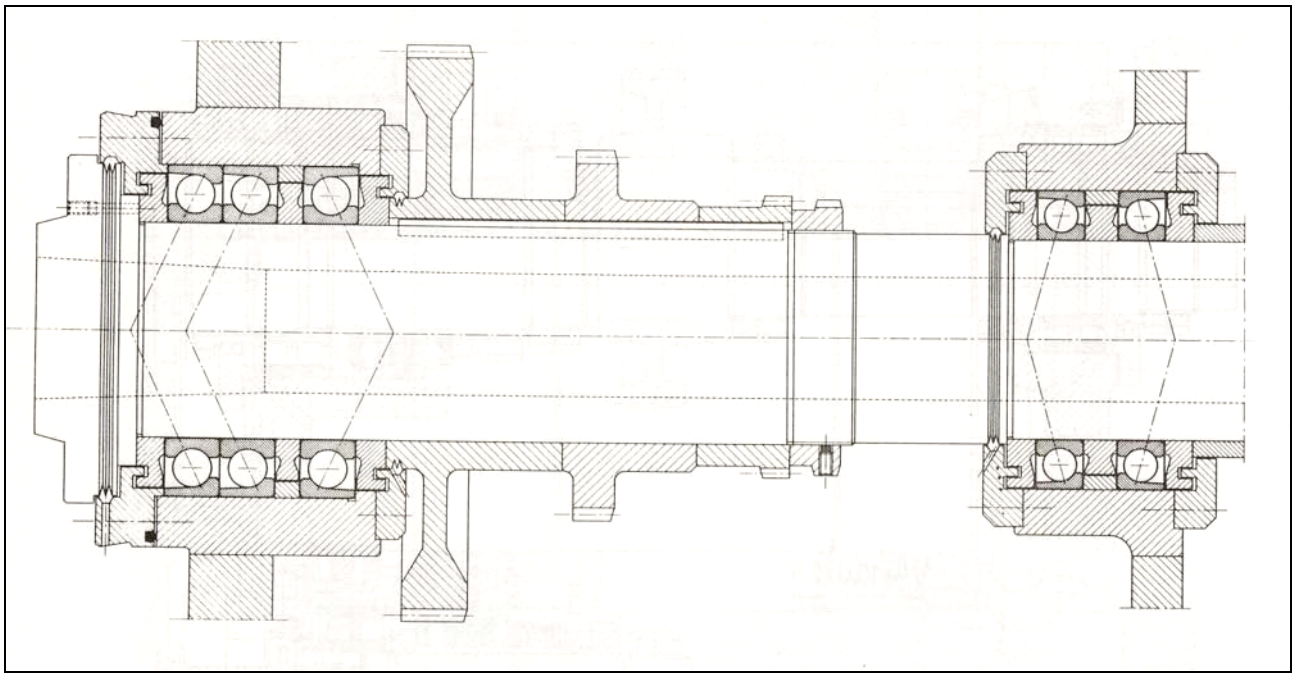


Figure 25 : *Exemple sur une broche de tour (25 Kw pour 2400 tours/minute)*

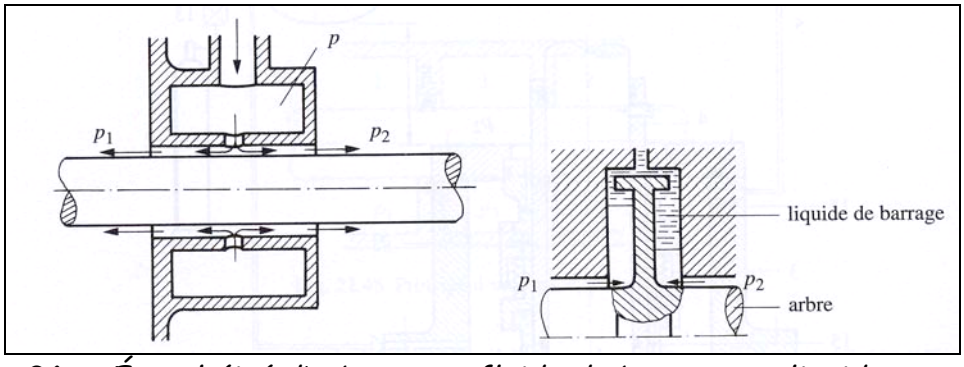


Figure 26 : *Étanchéité d'arbre avec fluide de barrage ou liquide centrifugé*

5. Conclusions

L'étanchéité d'une enceinte sous pression se quantifie par le débit de fuite, sachant que les petites fuites son difficilement décelables et mesurables. Le dimensionnement des étanchéités sur la base d'un débit de fuite admissible reste difficile.

L'étanchéité statique entre deux surfaces s'obtient :

- en polissant les surfaces (diminution de la rugosité donc de l'espace entre les surfaces pour minimiser le débit de fuite).
- En remplissant l'espace par un joint à comportement plastique (remplissage des aspérités).
- En assemblant les pièces de manière permanente (soudure).

Les joints d'étanchéité doivent résister à la pression, à la température (mini et maxi) ainsi qu'à l'agression chimique des fluides à étancher. Pour résister à la pression, la pression de serrage doit être déterminée en fonction des caractéristiques du matériau (seuil de plasticité en fonction de la température) et de la surpression entre les deux fluides à étancher. Les joints serrés à partir d'un montage boulonné sont susceptibles de fuir après une certaine période du fait du fluage du joint. On doit alors reprendre le serrage ou prévoir un assemblage assez souple pour maintenir la pression sur le joint, et plus particulièrement lorsque des dilatations thermiques sont à craindre.

Les montages de type autoclave (cf figure 6) s'emploient surtout à haute pression, leur étanchéité n'étant pas affectée par le fluage du joint mais il faut toujours vérifier le serrage initial.

Les soudures sont en général parfaitement étanches, par contre elle n'autorisent aucune dilatation des tubes, donc il faut prévoir des formes permettant cette dilatation.

L'étanchéité dynamique entre deux pièces s'obtient par :

- Des joints toriques ou à 4 lobes pour des vitesses faibles.
- Des joints à lèvres dont la lèvre d'étanchéité est appliquée contre l'arbre ou (et) l'alésage par son élasticité propre ou un ressort voire la pression du fluide (Vitesses > 3 m/s).
- Des presse-étoupes.
- Des garnitures mécaniques (vitesses élevées, fluides corrosifs).
- Des segments.
- Des joints à liquide ferro-fluide (un aimant permet de retenir le fluide avec les particules métalliques) : voir Figure 28.
- Des fluides de barrages.

Les dispositifs d'étanchéité à labyrinthe ne font que limiter le débit de fuite, les pièces mobiles ne se touchant pas : l'avantage principal est la non usure des pièces en mouvement et la visualisation du sens de la fuite.

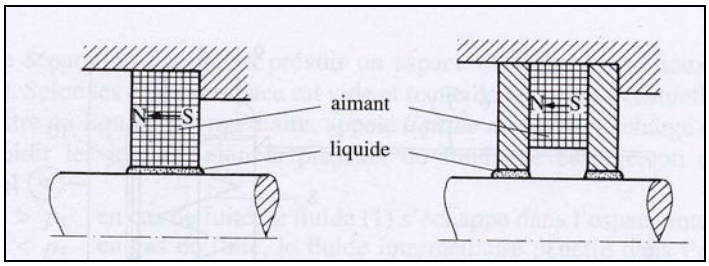


Figure 28 : *Joint avec liquide ferro-fluide*

Il est utile de lubrifier les surfaces d'étanchéité glissantes , soit par de la graisse, soit par de l'huile voir le liquide à retenir.

L'étanchéité parfaite au passage de pièces effectuant seulement de petits mouvements s'obtient avec des membranes souples (Doseurs) ou des soufflets.

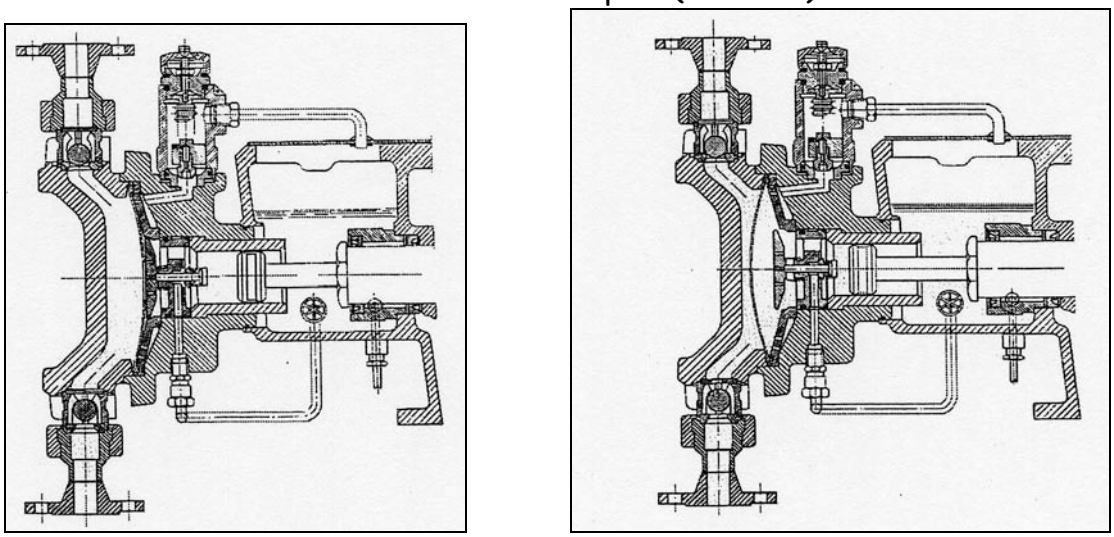


Figure 29 : *Dispositifs d'étanchéité de type doseurs (Aspiration & Refoulement)*

Bibliographie

Conception des machines (Principes et Applications) Spinnler Tome 3 Presse Universitaire de Lausanne
Joints d'étanchéité BUSAK+LUYKEN
Joints d'étanchéité PAULSTRA
Joints d'étanchéité SIMRIT
BOSCH Automation
Le Joint Français
France Joint